

# Changement climatique et littoral méditerranéen : comprendre les impacts, construire l'adaptation

*Synthèse des programmes de recherche CIRCLE-Med*  
2008-2011

Laurent Basilico, Marie Mojaïsky, Maurice Imbard

Édition VERSeau Développement

Cette brochure a été éditée grâce au financement du ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (CGDD/DRI) sous la coordination de l'Association VERSeau Développement, et dans le cadre de sa participation au programme ERA-Net CIRCLE.

Les auteurs remercient le programme GICC pour les textes empruntés à l'ouvrage *Changement climatique : impacts sur le littoral et conséquence pour la gestion* (Laurent Basilico, Natacha Massu et Daniel Martin).

**Contacts :**

■ **Marie Mojaisky**, Coordinatrice CIRCLE-Med  
VERSeau Développement  
mojaisky@verseaudeveloppement.com

■ **Maurice Imbard**, Chargé de mission changement climatique  
MEDDTL CGDD/DRI/SR  
maurice.imbard@developpement-durable.gouv.fr

# Changement climatique et littoral méditerranéen : comprendre les impacts, construire l'adaptation

*Synthèse des programmes de recherche CIRCLE-Med*  
2008-2011

Laurent Basilio, Marie Mojaïsky, Maurice Imbard

Édition VERSeau Développement

**D**es falaises de l'Algarve à la baie de Tunis, du détroit de l'Èbre à la côte dalmate, les rivages méditerranéens abritent, sur plus de 46 000 kilomètres, un patrimoine naturel et culturel sans équivalent. Berceau des civilisations antiques, espace de contacts autant que de contrastes, la «mer au milieu des terres» rassemble aujourd'hui plus de 420 millions d'habitants, répartis dans 22 États. Ses côtes concentrent des enjeux sociétaux et économiques majeurs : industrie, tourisme, agriculture, installations portuaires. Elles sont aussi le lieu d'une biodiversité remarquable. Zone refuge au cours des grandes glaciations quaternaires, le bassin méditerranéen abrite 10% des plantes à fleurs du monde entier, et un grand nombre d'espèces végétales ou animales endémiques.

Dans un contexte de pressions anthropiques croissantes, l'avènement du changement climatique suscite de nombreuses interrogations. Selon le quatrième rapport du GIEC, les écosystèmes méditerranéens seraient parmi les plus menacés par l'évolution annoncée du climat. Quels seront les impacts de l'élévation du niveau de la mer, de son acidification, de l'évolution du régime des précipitations, sur ces équilibres vulnérables ? Sur les écosystèmes côtiers, les masses d'eau de transition, les nappes phréatiques ? Quelles conséquences faut-il en attendre sur la qualité et la disponibilité de la ressource en eau, enjeu vital pour l'approvisionnement des populations, l'aquaculture et l'agriculture ? Comment, enfin, préparer dès aujourd'hui l'adaptation de nos sociétés à ces changements, et quels outils mobiliser pour ce faire auprès des parties prenantes ?

Sicile  
© Maurice Imbard



# Introduction

À l'interface de la climatologie, de l'hydrologie, de la biologie, des sciences économiques et sociales, les questions cruciales de l'adaptation appellent un vaste champ de connaissances scientifiques nouvelles, alimentant la décision locale comme les politiques globales. C'est dans cet objectif qu'ont été menés les huit projets de recherche portés par la coordination internationale CIRCLE-Med, dont la conférence finale de restitution a rassemblé, les 22 et 23 mars 2011 à Aix-en-Provence, plus de 65 acteurs scientifiques, gestionnaires et représentants de collectivités issus de 10 pays.

Mobilisant des équipes scientifiques de neuf pays, ces projets ont généré, au terme de deux années bien remplies, une moisson considérable de connaissances nouvelles pour l'adaptation au changement climatique, sur des thématiques originales et complémentaires. Pour certains, ils constituent des avancées fondatrices dans des champs encore peu investis par la recherche. Les informations apportées dans la présente synthèse ne fournissent qu'un rapide panorama de ces apports : outre les importants rapports finaux délivrés pour chaque projet, les travaux des équipes CIRCLE-Med se sont déjà traduits par une trentaine de publications scientifiques, et de nombreuses autres sont en cours d'acceptation ou en préparation.

Au-delà des progrès induits pour la compréhension des impacts du changement climatique sur le bassin méditerranéen,

les projets CIRCLE-Med, menés dans une optique d'appui à la décision, ont favorisé, sur chacun des sites concernés un dialogue entre science, gestionnaires et acteurs locaux autour de ces questions complexes. Ils constituent à ce titre autant d'avancées vers une gestion intégrée, proactive et transdisciplinaire du littoral méditerranéen. Dans cet objectif, les expériences participatives menées localement sont également porteuses de précieux apports méthodologiques pour la sensibilisation des acteurs, leur mobilisation, et la co-construction de l'adaptation.

Enfin, le cycle CIRCLE-Med a apporté, en phase avec l'esprit du mécanisme ERA-Net, une contribution précieuse à la mise en réseau de l'Europe de la recherche – et à sa connexion avec les universités et laboratoires des rivages sud de la Méditerranée. De Montpellier à Faro, de Tunis à Haïfa, de Palerme à Tirana, des ponts ont été bâtis entre les équipes scientifiques engagées sur les projets, mais aussi avec d'autres partenaires de recherche, des organismes publics, des collectivités locales, des acteurs économiques. Ces liens, contractuels ou informels, constituent un acquis majeur des projets. Ils doivent maintenant être entretenus, exploités, pérennisés par le biais de collaborations à venir, pour poursuivre les travaux initiés par CIRCLE-Med ou explorer des pistes complémentaires. C'est dans la durée que se construiront les réponses de nos sociétés aux défis cruciaux du changement climatique : du global au local, de l'analyse ciblée à la vision intégrée. ■

# Sommaire

<b>1 – Changement climatique et régions littorales :</b>	
<b>notions préliminaires et projections globales .....</b>	<b>8</b>
1.1 – Quel changement climatique ?.....	10
1.2 – Quelles conséquences pour les régions littorales ?.....	11
1.3 – Le pourtour méditerranéen : entre intégration et multiplicité.....	14
<b>2 – Comprendre les impacts : de l'écologie à l'économie.....</b>	<b>18</b>
2.1 – Impacts sur les écosystèmes marins : cas des bivalves.....	20
2.2 – Impacts sur la bande intertidale.....	23
2.3 – Impacts sur les eaux de transition .....	26
2.4 – Impacts sur les nappes phréatiques et les écosystèmes dépendants.....	31
2.5 – Impacts sur les bassins versants côtiers.....	35
2.6 – Vers une gestion intégrée : étude pilote dans le golfe de Gabès (Tunisie) ..	38
<b>3 – Construire l'adaptation : outils et méthodes.....</b>	<b>42</b>
3.1 – Quelles recommandations à la gestion ?.....	44
3.3 – Mobilisation des acteurs locaux : retours d'expérience .....	48
3.2 – Projet Aquimed : des outils participatifs pour construire l'adaptation .....	50
<b>Liste des publications .....</b>	<b>42</b>
<b>Références bibliographiques et webographie.....</b>	<b>60</b>

# CIRCLE-Med en bref

Créé en 2002 par la Commission européenne, le mécanisme **ERA-Net** (*European research area network*) joue depuis un rôle prépondérant dans la mise en réseau de l'espace européen de la recherche : il permet à des bailleurs de fonds nationaux dans le domaine de la recherche de se coordonner à l'échelle européenne et d'émettre des appels à propositions communs. Il est notamment à l'origine du projet ERA-Net **CIRCLE** (*Climate impact research and response coordination for a larger europe*), réseau européen de coordination de programmes de recherche dédiés à l'adaptation au changement climatique. Débuté en 2004 avec un financement du sixième programme cadre de recherche et développement (PCRD6) de la Commission, ERA-Net CIRCLE est depuis 2010 financé par le programme PCRD7. Il constitue aujourd'hui un réseau de 34 institutions issues de 23 pays (ministères, autorités régionales, organismes gestionnaires de projets). Il développe un fonctionnement par groupes géothématiques – espace méditerranéen, domaine nordique ou espace montagnard – pour lesquels les connaissances sur les impacts du changement climatique et les solutions possibles d'adaptation demandent une approche intégrée et partagée.

Trois appels joints à projets de recherche ont été lancés à ce jour dans le cadre de CIRCLE, correspondant aux trois premiers groupes géo-thématiques identifiés :

- «Gestion de l'eau en zones côtières méditerranéennes» en 2007 (Circle-Med)
- «Conséquences du changement climatique pour les politiques des pays nordiques» en 2007 (Circle-Nordic)
- «Adaptation en zones de montagne» en 2009 (Circle-Mountain)

En juillet 2007, l'appel à proposition de recherches **CIRCLE-Med**, dédié à la thématique de la gestion de l'eau en zones côtières méditerranéennes, a été lancé par cinq partenaires co-financiers du réseau ERA-Net CIRCLE : les Ministères français, italien et israélien en charge de l'environnement, la Fondation portugaise pour la science et la technologie (FCT) et le Conseil de l'innovation et de l'industrie de Galicie. Sur seize propositions reçues, huit projets furent sélectionnés pour un budget total de 1,65 M€, chaque partenaire financeur gardant la maîtrise de sa contribution. Les programmes retenus, d'une durée de deux ans, ont associé des structures de recherche en France, Italie, Portugal, Espagne, Israël, Maroc, Tunisie, Croatie et Albanie. La coordination et la valorisation de ces travaux ont été pilotées par le MEDDTL (Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement), avec l'appui technique de l'association VER-Seau Développement. Outre le site internet [www.circle-med.net](http://www.circle-med.net), l'information sur les projets a été partagée par la diffusion de lettres d'information trimestrielles.



Figure 1. Les sites d'étude et de coordination des projets CIRCLE-Med





1

# Changement climatique

notions préliminaires et projections globales

# et régions littorales :

Le quatrième rapport du GIEC (Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), paru en 2007, établit l'existence d'un changement climatique : *«Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, car il ressort désormais de l'observation de l'augmentation des températures moyennes mondiales de l'atmosphère et des océans, de la fonte généralisée des neiges et des glaces, et de l'élévation du niveau moyen mondial de la mer.»* (GIEC, 2007)

Le rapport constitue en outre une avancée majeure dans l'explication des mécanismes contribuant à ce changement, et confirme l'origine anthropique de ce dernier : *«L'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre anthropiques.»* (GIEC, 2007)

En introduction aux travaux menés dans le cadre de CIRCLE-Med, cette première partie fournit un repérage des connaissances actuelles sur le changement climatique et dresse un panorama des méthodes et des scénarios utilisés en climatologie. Elle donne un aperçu général des différentes conséquences – observées ou attendues – de ce changement sur les eaux marines et sur le littoral : élévation du niveau moyen de la mer, de sa température, acidification des océans. Elle présente enfin le contexte particulier du bassin méditerranéen, et introduit, au regard de ses spécificités environnementales et sociétales, les implications du changement climatique sur les écosystèmes côtiers, les nappes phréatiques et les usages locaux de la ressource en eau.

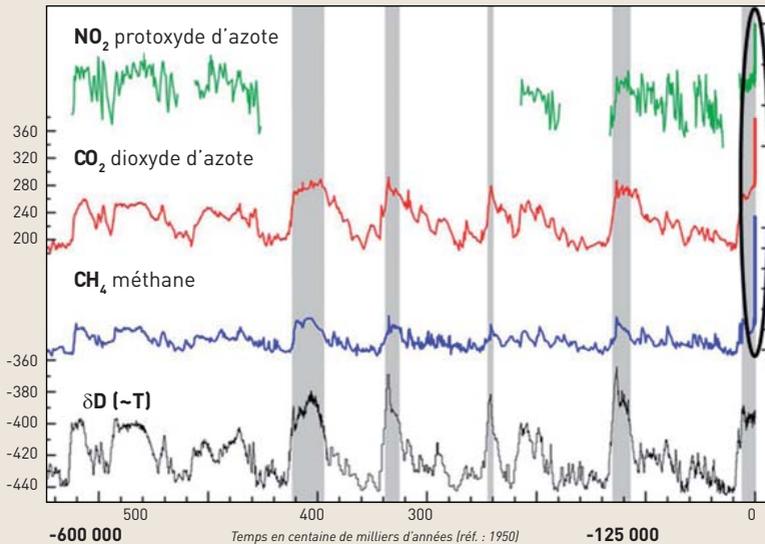
## 1.1 – Quel changement climatique ?

Depuis 1910, la température moyenne de la Terre s'est accrue d'environ 0,6 °C. La décennie 1990 a été la plus chaude du XX<sup>e</sup> siècle, en valeur moyenne et au niveau planétaire, avec un record pour l'année 1998. La décennie actuelle ne dément pas cette tendance, et l'année 2010 a été la plus chaude jamais enregistrée, à égalité avec 2005. Le diagramme ci-dessous illustre la rapidité et l'intensité de cet accroissement, sans précédent depuis l'ère quaternaire.

### Scénarios d'émissions et projections climatiques

Pour alimenter les modèles climatiques utilisés par les scientifiques et générer des projections, le GIEC établit divers scénarios d'émissions basés sur différentes hypothèses d'évolution socio-économiques et

géopolitiques. Dans le quatrième rapport, deux scénarios sont fréquemment cités. Le scénario dit A2, le plus pessimiste, envisage une certaine inaction ou inefficacité des autorités mondiales, qui ne pourraient éviter d'ici 2100 un triplement des concentrations en gaz à effet de serre depuis la révolution industrielle. Celui-ci se traduirait par une augmentation de température moyenne, pour la France, de 5°C en un siècle. Le scénario B2 correspond quant à lui à une réduction efficace et générale des émissions permettant de ralentir l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, laquelle limiterait l'accroissement de la température moyenne, en France, à 3°C d'ici 2100. Ce scénario, présenté comme «optimiste», correspondrait tout de même à une augmentation moyenne de la température de la planète supérieure à tout ce qu'elle a connu au cours des 400 000 dernières années.



**Figure 2.** Variations de la température moyenne de la Terre et concentrations atmosphériques de quelques gaz à effet de serre, du quaternaire à nos jours. Reconstruction paléoclimatique sur la base de carottages glaciaires. Projet EPICA dome C.

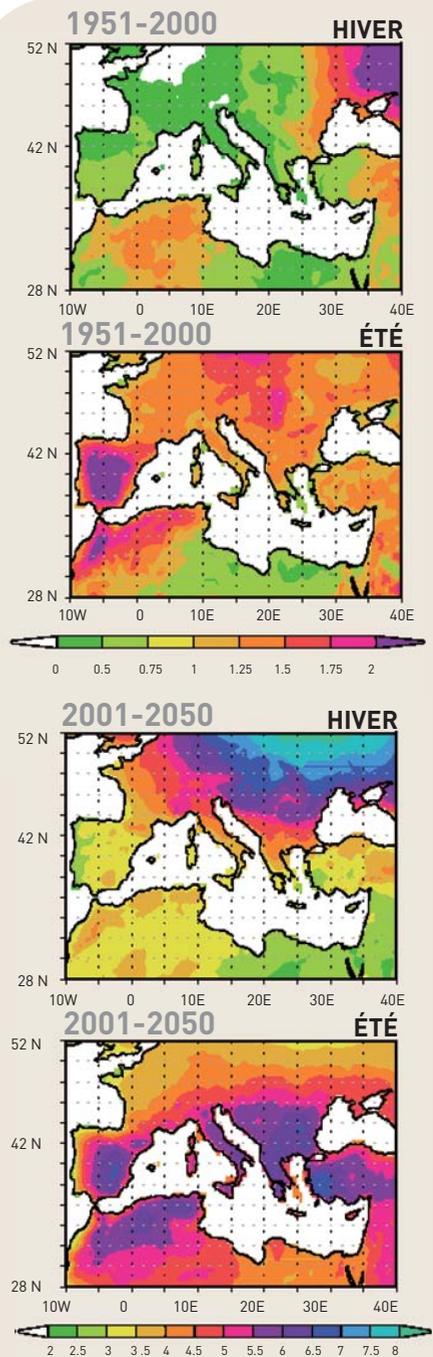
## Modèles climatiques, incertitudes et régionalisation

Ces projections globales restent entachées d'une forte incertitude, issues des forçages (scénarios d'émission), des imprécisions inhérentes aux calculs numériques, et de la prise en compte toujours perfectible par les modèles de certains mécanismes du système climatique.

Un axe de progression, essentiel dans une perspective de gestion et d'adaptation, concerne ainsi la résolution spatiale des projections, ou «**descente d'échelle**» : les projections globales masquent une grande diversité des évolutions locales, en termes de température et de précipitations. Pour le bassin méditerranéen, cette descente d'échelle a notamment été amorcée avec le projet CIRCE ([www.circeproject.eu](http://www.circeproject.eu)), évoqué dans la section 1.3 de la présente synthèse. La figure suivante est un exemple des résultats des simulations de CIRCE.

### 1.2 – Des conséquences multiples sur les régions littorales

La conséquence la plus médiatisée du changement climatique sur le littoral est bien sûr l'élévation du niveau de la mer, qui suscite dès aujourd'hui de nombreuses recherches portant sur l'adaptation des écosystèmes, la gestion du trait de côte ou la préservation des enjeux socio-économiques. Mais d'autres implications du changement climatique impactent dès aujourd'hui les milieux côtiers : l'acidification et le réchauffement des océans modifient les équilibres écologiques, et par conséquent les secteurs de l'aquaculture, de la pêche ou du tourisme.



**Figure 3.** Moyenne multi modèle de la température à 2 mètres du sol obtenue par les simulations du projet CIRCE pour les périodes de 1951-2000 et 2001-2050. L'unité de l'échelle est le [°C/décennie] multiplié par un facteur 10 pour une meilleure lisibilité (Gualdi S. et al, in press).

Enfin, des évolutions importantes sont à prévoir sur la qualité et la disponibilité des ressources en eau douce. L'élévation du niveau de la mer accroît le risque d'intrusions salines dans les nappes phréatiques. La tension sur la ressource sera encore accrue par les modifications annoncées du régime des précipitations, couplées à un accroissement des besoins sociétaux – pour l'irrigation par exemple. Ces impacts préfigurent des enjeux de gestion majeurs, dont la prise en compte par la sphère de la recherche est encore naissante.

### *Une élévation inéluctable du niveau de la mer*

Celle-ci est déjà observée : entre 1900 et 2000, on a relevé une élévation moyenne globale de 1,7 mm/an. La tendance s'accélère actuellement : entre 1993 et 2003, le rythme global a été de 3,1 mm/an, ce qui correspond à une élévation de **31 cm sur un siècle**. Les contributions à l'élévation du niveau de la mer sont multiples : dilatation thermique de l'eau due au réchauffement, fonte des glaciers, du Groenland et de l'antarctique, apport des eaux continentales. Pour calculer les conséquences à venir du changement climatique sur les masses d'eau océaniques,

les climatologues utilisent des modèles couplés océans-glaciers-atmosphère. On peut donner ici quelques projections d'élévation pour la décennie 2090-2099, en référence à 1980-1999. Pour le scénario B2 (augmentation de la température moyenne globale de 2,4°C), celle-ci serait comprise entre 0,20 et 0,43 m. Dans le cas du scénario A2 (+ 3,4°C), l'augmentation du niveau de la mer serait comprise entre 0,23 et 0,51 m (GIEC, 2007).

### *Réchauffement et acidification des océans*

Outre l'élévation du niveau de la mer, le changement climatique se traduit par des modifications des caractéristiques physico-chimiques des eaux marines. Le premier paramètre impacté est bien sûr la température : l'océan mondial a stocké plus de 90% de l'augmentation de quantité de chaleur reçue par la planète pendant la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle (Bindoff *et al.*, 2007). Levitus *et al.* (2009) estiment que **la température moyenne des eaux superficielles a augmenté de 0,17°C** depuis 1969. Cette tendance est, là encore, inégalement répartie dans l'espace. C'est en Atlantique Nord qu'elle a été la plus marquée (+0,4°C).



Ce réchauffement s'accompagne d'une série d'évolutions des équilibres chimiques. Alors que la concentration en oxygène des eaux marines tend à diminuer (Keeling *et al.*, 2010), la concentration en CO<sub>2</sub> connaît un accroissement significatif : on estime que les océans absorbent 25 à 30 % du CO<sub>2</sub> émis par les activités humaines. Cette absorption entraîne une **acidification** des eaux superficielles marines, qui ont connu une diminution de leur pH moyen d'environ 0,1 depuis 1800 – avec toujours des disparités géographiques.

La dynamique couplée du réchauffement et de l'acidification de l'océan mondial se caractérise par une grande complexité, incluant différents mécanismes de rétroaction. Par exemple, l'élévation de la température diminue la solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau. Des impacts sont également attendus sur les écosystèmes, et les premières communautés biologiques concernées pourraient être les bivalves à coquilles carbonées, dont la physiologie est liée au pH du milieu.

### Conséquences sur les écosystèmes : un défi scientifique

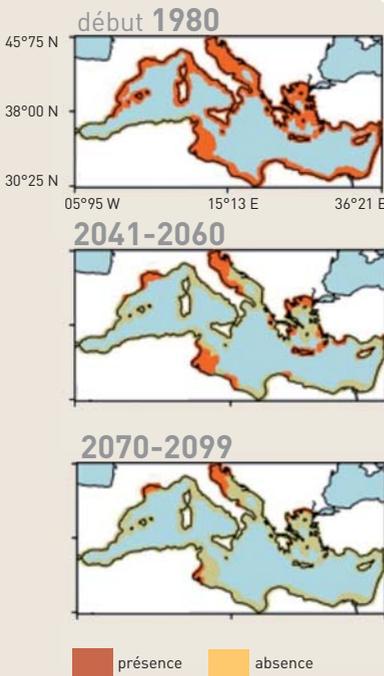
La compréhension et la prévision des réponses possibles de la biodiversité marine à ces changements couplés – réchauffement, acidification, modification des équilibres chimiques – restent un véritable défi scientifique. Des impacts sont attendus, et souvent déjà observés, sur les **aires de répartition** des espèces, mais aussi sur le fonctionnement des réseaux trophiques, avec par exemple des altérations des relations prédateurs-proies. Le réchauffement a en outre pour effet de réduire l'apport de nutriments aux eaux superficielles en renforçant leur stratification. Cet appauvrissement limite la production primaire et favorise l'extension de « déserts océaniques » (Polovina *et al.*, 2008). L'apparition **d'espèces envahissantes**, déjà constatée, pourrait également être favorisée par le changement climatique ; enfin, la diminution de la concentration en oxygène des eaux marines pourrait aggraver jusqu'à l'anoxie les effets de l'eutrophisation des eaux côtières (Diaz et Rosenberg, 2008).

Pour ce qui est des poissons, l'analyse des variations d'aires de répartition a beaucoup progressé au cours de la dernière décennie. À l'échelle mondiale, Cheung *et al.* (2008, 2009) ont esquissé une projection des effets de différents scénarios sur l'organisation de 1066 espèces de poissons et invertébrés marins. En Méditerranée, sur la base d'une simulation océanographique physique publiée dans Somot *et al.* (2006), Ben Rais Lasram *et al.* (2010) ont cartographié l'évolution jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle des habitats potentiels de 75 endémiques, en quasi-totalité côtières. La figure ci-après (Fig. 4) montre les résultats obtenus, dans le cas du scénario A2 du



Camargue  
© Michel Dukhan

GIEC, pour la fausse-limande (*A. kessleri*) : les résultats montrent la disparition progressive, d'ici 2099, de 90% des habitats favorables à cette espèce, aujourd'hui répandue dans tout le bassin. Toujours dans le scénario A2, la température superficielle aura augmenté de 3,1 degré en 2070-2099. Les habitats seront réduits pour 50 des espèces endémiques considérées, et 14 d'entre elles disparaîtront vraisemblablement. À l'inverse, certaines verront leur aire de répartition s'étendre, à l'image de la sole égyptienne, qui pourrait occuper tout le bassin à la fin du siècle (source CCBio, 2011).



**Figure 4.** Évolution de l'aire de répartition de la fausse limande (*Arnoglossus kessleri*) en Méditerranée au XXI<sup>e</sup> siècle pour le scénario A2 (Ben Rais Lasram *et al.* 2010).

### 1.3 – Le pourtour méditerranéen : entre intégration et multiplicité

Carrefour entre Nord et Sud, entre Orient et Occident, la Méditerranée est un espace de contact autant que de fractures. Ses rives, densément peuplées, baignent 22 pays sur trois continents. Partout, la bande côtière concentre des populations et des enjeux socio-économiques importants. Les contrastes sont évidents entre le Nord développé et le Sud en développement. D'un côté, une démographie stabilisée ; de l'autre, des populations jeunes et en accroissement. D'un côté, un socle politique portée par l'Union européenne ; de l'autre, des constructions démocratiques encore naissantes. D'un côté le monde judéo-chrétien, de l'autre la civilisation islamique.

Mais au-delà de ce clivage schématique, chaque pays diffère de ses voisins par son histoire, sa culture, sa réalité propre. De même, il partage avec eux une histoire, une culture, une réalité communes : celles du bassin méditerranéen.

L'une de ces caractéristiques partagées tient à un climat spécifique, auquel la Méditerranée a donné son nom. À l'exception des littoraux libyen et égyptien, de type désertique, le climat méditerranéen baigne l'ensemble du bassin et s'étend jusqu'aux côtes atlantiques du Maroc et du sud du Portugal. Il est caractérisé par quatre saisons contrastées. Les étés chauds sont marqués par une faible pluviométrie, et connaissent régulièrement des sécheresses parfois intenses. L'hiver est doux, la moyenne mensuelle des températures n'est jamais inférieure à 0°C. Le printemps et surtout l'automne concentrent l'essentiel des pluies. Les quantités annuelles de précipitations sont relativement importantes : 765 mm

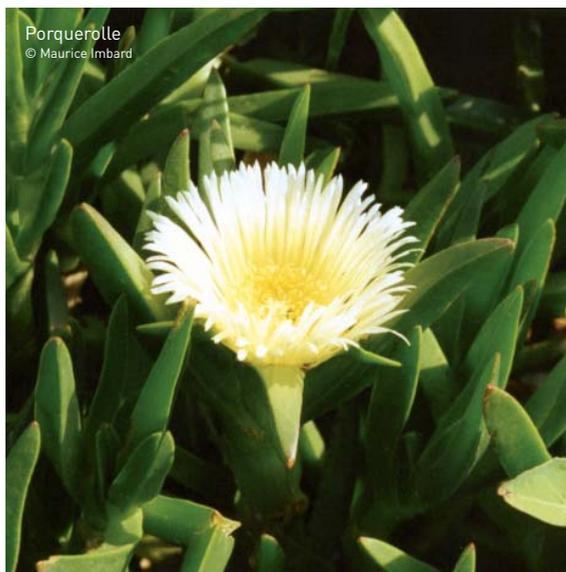
## Changement climatique et changement global : les difficultés de l'attribution

Le changement climatique s'opère dans le contexte du faisceau plus large des pressions anthropiques s'exerçant sur les écosystèmes aquatiques. En quelques décennies, l'industrie et l'agriculture ont entraîné de nombreuses pollutions dans les sols, les masses d'eau côtières, les estuaires et les lagunes. L'urbanisation accélérée a engendré une artificialisation des rivages et la dégradation des milieux naturels, la globalisation des transports a entraîné l'arrivée dans les écosystèmes d'espèces exotiques et parfois envahissantes. L'impact de ces pressions sur les milieux est bien souvent couplé avec celui du changement climatique. Ce dernier entraîne par exemple des conditions plus favorables pour la pullulation de certaines espèces et accélère l'eutrophisation des milieux aquatiques. De même l'accroissement des températures se traduit par des besoins croissants en eau d'irrigation, qui génèrent en retour des impacts supplémentaires sur le débit des fleuves côtiers ou la balance recharge-prélèvement des nappes phréatiques.

Dans ce contexte d'interactions multiples et d'impacts croisés, l'attribution d'un impact observé à une cause donnée est une difficulté récurrente des recherches menées pour l'adaptation. Telle réduction constatée localement d'une population de moules est elle imputable au réchauffement de l'eau, à son acidification, à un polluant chimique, à une prolifération d'algues – ou, plus probablement, à la combinaison de plusieurs de ces facteurs ? La notion de changement climatique comme composante d'un changement global est désormais consensuelle. Dès lors, le véritable enjeu des recherches menées sur l'adaptation au changement climatique est bien de diminuer la vulnérabilité des écosystèmes et des sociétés humaines au changement global. Réciproquement, l'amélioration de la capacité d'adaptation des milieux suppose un effort concerté pour la réduction des pressions anthropiques locales.

à Alger, 862 mm à Nice, et même 2 000 mm sur les Cévennes. Parfois très concentrées dans le temps, elles peuvent avoir des conséquences dramatiques : c'est le cas, en France, des «épisodes cévenols» susceptibles de provoquer des crues soudaines et dévastatrices à l'automne. Enfin, le climat se distingue par une forte variabilité interannuelle, ce qui constitue une difficulté supplémentaire pour la gestion de la ressource en eau.

Ces caractéristiques climatiques se traduisent par une biodiversité aussi remarquable que vulnérable. Le bassin méditerranéen abrite 25 000 espèces de phanérogames, soit 10% des plantes à fleurs du monde entier (source : ENS Lyon). Plus de la moitié lui sont endémiques.



## Projet CIRCE : des projections climatiques de haute résolution pour le bassin méditerranéen

Pour progresser sur les questions cruciales de l'adaptation, la première condition est de disposer de projections climatiques fiables *localement*. Pour le bassin méditerranéen, une étape-clé dans cette « descente d'échelle » a été franchie avec le projet CIRCE\*, financé par le PCRD6 et co-organisé par l'Institut national de géophysique et de vulcanologie (INGV, Italie). Grâce à l'emploi de modèles avancés, il a permis d'affiner les travaux du GIEC sur le pourtour méditerranéen, aboutissant à un faisceau de projections climatiques à l'horizon 2050, de résolution spatiale élevée (30 km, contre 300 pour les projections globales du GIEC). Ses conclusions ont été présentées lors de la conférence finale du projet, organisée du 23 au 25 mai 2011 à Rome. Il en ressort que la région connaîtra un réchauffement plus marqué que la moyenne mondiale, avec un accroissement de la température de surface de la mer compris entre 0,8°C et 1,8°C en 2050. Ce qui se traduira par une élévation du niveau des eaux comprise entre 6 et 12 cm. Les précipitations moyennes chuteront de 5 à 10% par rapport aux valeurs actuelles, tandis que les événements extrêmes (inondations, pluies torrentielles, cyclones) seront plus fréquents. Ces chiffres ne sont cependant que des ordres de grandeur moyens : les modèles de CIRCE ont mis en évidence le caractère hautement imprévisible du système méditerranéen, très influencé par sa topographie complexe et sujet à une grande variabilité spatiale.

Pour aller plus loin et permettre une véritable adaptation des politiques nationales, régionales mais aussi – et surtout – locales aux impacts du changement climatique, il est désormais nécessaire de construire le dialogue entre recherche, gestion et usages sociétaux au niveau des territoires : port, bassin versant ou plaine côtière, par exemple. C'est dans cet objectif qu'ont été menés huit projets de recherche impulsés par CIRCLE-Med.

\* [www.circeproject.eu](http://www.circeproject.eu)

À l'heure du changement global, nombre de ces espèces subissent la fragmentation voire la disparition de leurs habitats : environ 5 000 d'entre elles (17% de la flore totale) sont classées comme menacées, rares ou vulnérables par l'Union mondiale pour la conservation de la nature (IUCN). Ainsi, 80% des plantes concernées par la *Directive Habitats* de l'Union européenne sont présentes dans les pays méditerranéens. Les pressions anthropiques affectent également la faune méditerranéenne, à l'image du phoque moine (*Monachus monachus*), quasiment disparu de la mer Égée ou des côtes du Maghreb où il était autrefois très commun. Les milieux aquatiques, les zones humides, les espaces deltaïques, abritent des écosystèmes particulièrement fragiles, surtout au sud.

De même qu'il impacte les écosystèmes méditerranéens, le changement climatique constitue un facteur d'inquiétude croissant pour les enjeux socio-économiques concentrés dans le bassin. Cette inquiétude concerne en premier lieu la **ressource en eau douce**, besoin vital pour l'alimentation en eau potable des populations, mais aussi pour une agriculture qui repose largement sur l'irrigation. Comment l'accroissement annoncé des températures et les modifications du régime des pluies affecteront-elles les hydrogrammes des fleuves côtiers ? Dans quelle mesure la submersion menace-t-elle les nappes phréatiques d'intrusions salines ? Comment la qualité et la disponibilité de la ressource en eau seront-elles impactées par ces évolutions ? Et quelles conséquences indirectes peut-on en attendre sur l'agriculture, l'aquaculture, ou encore le tourisme, dont le bassin méditerranéen est la première destination mondiale ? ■



2

## Comprendre les impacts : de l'écologie à l'économie



**D**e 2008 à 2010, les huit projets de recherche CIRCLE-Med ont exploré différentes facettes de la problématique de l'adaptation au changement climatique. Menés dans un souci constant de dialogue avec les gestionnaires et décideurs locaux, ils se sont nourris d'expérimentations et de collaborations construites sur un ensemble de 22 sites d'études, représentatifs de la diversité du bassin méditerranéen – de Oualidia sur la côte marocaine à Bat Yam en Israël, du parc naturel de Camargue à l'île de Lampedusa, au large de la Sicile. En préalable à la construction des politiques d'adaptation, une part importante des efforts entrepris par les différentes équipes mobilisées était consacrée à l'acquisition de connaissances nouvelles sur les impacts attendus du changement climatique sur ces sites – et par extension, sur les sites aux caractéristiques écologiques et économiques comparables.

Cette seconde partie est consacrée à la présentation de ces apports scientifiques, pour chacun des écosystèmes considérés : écosystèmes marins, bande intertidale, lagunes, bassins versants côtiers, nappes phréatiques et écosystèmes dépendants.

## 2.1 – Impacts sur les écosystèmes marins : cas des bivalves

L'acidification consécutive à l'accroissement des concentrations en CO<sub>2</sub>, couplée aux autres modifications des équilibres biochimiques générées par le changement climatique, constitue un sujet d'inquiétude, en premier lieu, pour les populations de mollusques à coquilles carbonées. Ces animaux, parfois de grand intérêt patrimonial ou économique, sont un chaînon essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes marins : ils lient la production primaire aux niveaux trophiques supérieurs. En affectant la physiologie de ces espèces, l'acidification entraînerait en cascade des modifications de leurs actions sur les écosystèmes : taux de filtration, de respiration, d'excrétion. Le projet ACIDBIV s'est donné pour objectif de mener une **analyse intégrée** de ces impacts, et de leurs traductions pour les secteurs économiques de la pêche et de l'aquaculture.

Une étude préliminaire a permis de déterminer **les espèces de bivalves les plus pertinentes** pour les expérimentations et la modélisation, ainsi que les étapes de leur cycle de vie à étudier. Le choix de la moule *Mytilus galloprovincialis*, d'intérêt commun, s'est imposé à tous les partenaires. Deux autres espèces ont été retenues pour leur intérêt régional : le clam *Chamalina gallina*, exploité en Adriatique du Nord, et le clam *Ruditapes decussatus*, présent sur les littoraux d'Algarve et de Tunisie.

Une fois ces espèces identifiées, les partenaires ont défini un ensemble de protocoles expérimentaux et analytiques communs pour le suivi de 14 paramètres d'étude – par exemple : composition de la coquille, densité, taux de croissance, activité reproductive, mortalité.

### ACIDBIV

*Impacts couplés de l'acidification marine et du changement climatique sur les populations côtières de bivalves et l'aquaculture : caractérisation et adaptation*

#### Organismes financeurs

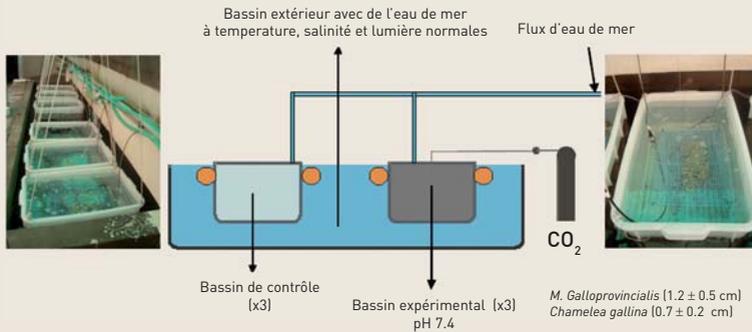
- IMELS Italian Ministry for Environment, Land and Sea
- FCT Foundation for Science and Technology - Ministry of Sciences, Technology and Higher Education
- CII Galicia Consellería de Innovación e Industria - Xunta de Galicia

#### Organismes partenaires

- UNIPD University of Padova - Department of Biology
- FSB Faculty of Sciences of Bizerta
- CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- CCMAR Centre of Marine Sciences of Algarve

Le scénario «pessimiste» A2 du GIEC a été choisi comme base de travail. Des modèles numériques, calés à l'aide des données historiques disponibles, ont été utilisés pour simuler ses implications sur le pH et les autres paramètres, pour les sites d'études de Ria Formosa (Portugal) et de la lagune de Venise (Adriatique Nord). Un grand nombre d'expérimentations ont été menées en laboratoire pour caractériser les effets à court ou à long terme (plusieurs semaines à plusieurs mois) de l'acidification sur la structure des coquilles, la croissance des juvéniles, le comportement alimentaire des individus.

Les observations ont été dans un second temps affinées par des études en mésocosmes, implantés à la station hydrobiologique de Chioggia (Italie) : en communication avec la lagune, les réservoirs permettaient d'isoler les effets du forçage en pH, les autres paramètres évoluant naturellement avec l'eau extérieure.



**Figure 5.** Dispositif expérimental pour l'étude en mésocosme des effets à long terme de l'exposition de bivalves juvéniles à l'acidification.

- Croissance
- Indice de Condition
- Développement des gonades
- Paramètres physiologiques et biochimiques

### Des impacts site-spécifiques

Cette série d'expériences, sans précédent sur le sujet, a mis en évidence des réponses contrastées à l'acidification. En Adriatique Nord, des effets très significatifs ont été observés pour les deux espèces considérées. L'exposition ponctuelle des adultes à un pH réduit, tout comme l'exposition à long terme des individus juvéniles, s'est traduite par des préjudices importants sur la formation des coquilles, et par une croissance minorée dans le cas de *C. gallina*. Lorsque les mollusques étaient de surcroît exposés à des valeurs de salinité et de température élevées, une mortalité accrue et une capacité moindre à survivre à l'air libre étaient observées. Les équipes ont également mis en évidence des altérations des fonctions de respiration, de filtration, ou encore des réponses immunitaires, pour les moules comme pour les clams. De manière générale, ces résultats montrent un affaiblissement très net des espèces soumises simultanément à un pH réduit et à des valeurs de température et de salinité correspondant aux limites de leur tolérance spécifique. **Ce constat suggère un risque accru localement d'extinction de ces espèces.**

En comparaison, les résultats obtenus dans la lagune de Ria Formosa montrent un impact moindre de l'acidification sur les populations. Des spécimens jeunes des deux espèces ont survécu plus de 80 jours à des valeurs de pH très basses (0,7), sans dommages majeurs pour les coquilles – mais avec tout de même une calcification moindre dans le cas des moules. Dans le cas de *R. dissicatus*, les altérations des paramètres physiologiques observées sous l'effet de l'acidification laissent entrevoir une croissance minorée à long terme : taux d'ingestion et de respiration plus bas, rejets ammoniacés accrus.

Les réponses de *M. galloprovincialis*, commune aux deux sites d'étude, différaient donc nettement d'un site à l'autre, mais aussi d'une étape à l'autre du cycle de vie. Cette observation, inattendue dans cette ampleur, met en évidence le danger qu'il y aurait à extrapoler des connaissances acquises localement. De même, les réponses obtenues pour une espèce donnée ne prévalent pas du comportement d'une autre espèce. **Les impacts de l'acidification sur les bivalves sont site-spécifiques, mais aussi propres à chaque espèce.**

Cette variabilité spatiale met en évidence la nécessité de prendre en compte les paramètres locaux susceptibles de renforcer ou de limiter les effets de l'acidification. Ainsi la chimie carbonée de la lagune de Ria Formosa se distingue-t-elle par son alcalinité totale très élevée, probablement couplée à des ruissellement eux-mêmes très alcalins en provenance des eaux continentales. Ce contexte a vraisemblablement limité l'impact de l'acidification sur la calcification et la croissance des coquilles.

Plus généralement, les bivalves vivant dans les eaux côtières de transition et estuariennes apparaissent naturellement plus exposées à des variations régulières de la chimie carbonée de l'eau que les populations implantées en pleine eau. Ce point, mis en évidence par des échantillonnages réalisés sur les habitats intertidaux de moules sur les côtes galiciennes, suggère que ces populations des eaux de transition pourraient présenter une meilleure tolérance à l'acidification annoncée des océans.

En conséquence, une piste de recherche pertinente consiste à étudier les interactions entre la composition chimique locale des eaux marines (pollutions, chimie du carbone) et les impacts biologiques de l'acidification due à l'accroissement du  $\text{CO}_2$  dissous. Dans cet optique, deux expérimentations ont été initiées à la suite du projet ACIDBIV, pour les mêmes espèces, à Padoue (Italie) et en Algarve.

### *Une analyse à poursuivre*

Mer semi fermée, la Méditerranée présente des caractéristiques océanographiques et biogéographiques uniques, qui peuvent contribuer à exacerber, ou au contraire à limiter, les impacts écologiques de l'acidification. L'apport croissant en nutriments des rivières, les pollutions, la pêche ou l'aquaculture, parmi d'autres pressions anthropiques, complexifient encore ce jeu d'interactions croisées. Au vu de l'importance des bivalves pour l'aquaculture ou les pêcheries méditerranéennes, tout préjudice porté à la viabilité ou à la productivité de leurs populations pourrait entraîner des dommages socio-économiques non négligeables. Ainsi les résultats obtenus par le projet ACIDBIV conduisent-ils à des inquiétudes réelles, en particulier quant au devenir des stocks naturels de clams en Adriatique Nord. Des mortalités constatées, couplées à une forte pression de pêche, se traduisent déjà par une importante régression de la densité des populations de ce mollusque sur la côte italienne de la mer Adriatique.

Pourtant, les études sur les impacts de l'acidification ne sont encore qu'une tendance naissante et les données solides restent rares. Dans ce contexte, ACIDBIV a constitué une avancée significative. Ses conclusions montrent la nécessité de poursuivre l'effort pour acquérir une meilleure compréhension des effets synergiques du changement global sur la survie, la croissance, la calcification et la physiologie de ces espèces de haute importance écologique et économique. À ce titre, les partenariats initiés par le projet constituent des fondations solides pour investir plus avant ce champ de recherche, dans une optique collaborative associant des équipes au Nord et Sud du bassin méditerranéen.



## 2.2 – Impacts sur la bande intertidale

Point de contact entre terre et mer, la bande du littoral comprise entre la limite haute et basse des marées concentre une biodiversité remarquable et des services écosystémiques de première importance pour le fonctionnement des espaces littoraux. Elle est aussi le lieu privilégié de la promenade, de la pêche à pied, de la rencontre entre l'homme et la vie marine. C'est vrai des rivages océaniques, où elle s'étire souvent sur des dizaines de mètres, mais aussi dans le bassin méditerranéen – alors même que la faiblesse des marées y réduit parfois l'estran à une bande de quelques décimètres de largeur.

Mené par les universités de Palerme (Italie), Haïfa (Israël) et Dubrovnik (Croatie), le projet INTERMED s'est donné pour objectifs d'évaluer les impacts du changement climatique sur les communautés intertidales du bassin méditerranéen, et d'en analyser les conséquences socio-économiques.

Résolument transdisciplinaire, le projet a associé biologistes, écologues, sociologues et économistes. Il a été décidé de concentrer l'effort sur six groupes biologiques clés

### INTERMED

*Impacts du changement climatique sur les communautés intertidales méditerranéennes : atteintes sur l'intégrité des écosystèmes côtiers et les services associés*

#### Organismes financeurs

- IMEP *Israel Ministry for Environmental Protection*
- IMELS *Italian Ministry for Environment, Land and Sea*

#### Organismes partenaires

- **University of Dubrovnik** *University of Dubrovnik, Dept of Aquaculture*
- **Recanati Institute** *Leon Recanati Institute for Maritime Studies, University of Haïfa*
- **LoEEB** *University of Palermo, Animal Biology Dept., Lab. of Experimental ecology and Behaviour*

du substrat rocheux ou du substrat meuble : clams, crabes, moules, patelles, éponges et escargots. Les analyses écologiques et socio-économiques, menées en parallèle, se sont nourries d'un échange constant entre les deux parties. Pendant deux années, ces travaux se sont déployés sur **plus de vingt sites d'étude**, répartis sur les côtes croate, israélienne, sicilienne, dans le golfe de Gênes, à Malte et à Lampedusa. Sur le plan écologique comme sur le plan socio-économique, le projet INTERMED prévoyait d'abord une étude approfondie de la bibliographie.

Cette première étape s'est avérée, dans les deux cas, plus courte que prévue. Les études existantes pour les organismes étudiés se caractérisent en effet par **des données très parcellaires**, et plus généralement les informations relatives aux impacts du changement global sur la bande intertidale méditerranéenne sont rares.

De même une recherche poussée de la littérature consacrée aux enjeux socio-économiques de l'intertidal méditerranéen a révélé l'absence quasi-totale de travaux antérieurs. Cet étonnant sous-investissement par la recherche des services économiques rendus par la zone intertidale est d'ailleurs constaté à l'échelle mondiale, à l'exception de travaux portant sur quelques habitats spécifiques (zones humides ou mangroves par exemple).

### *Cartographie, échantillonnages, mésocosmes : une moisson sans précédent d'informations*

Fort de ce constat, le versant écologique du projet s'est d'abord proposé de caractériser l'environnement de la bande intertidale méditerranéenne. Une cartographie des températures et de l'irradiance solaire a été dressée pour l'ensemble du pourtour. Des

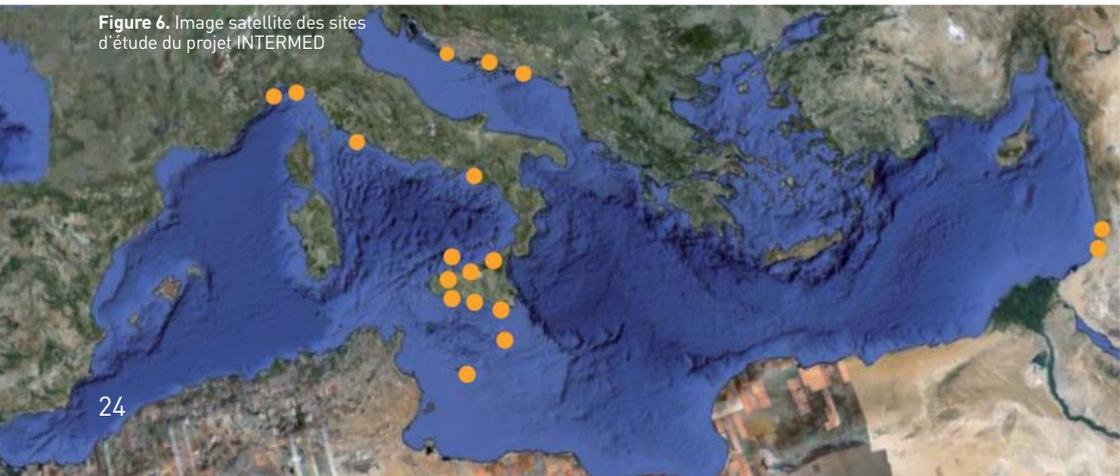
données relatives à la salinité, à la houle, et à d'autres variables environnementales ont été acquises.

Des échantillonnages ont été menés sur les côtes rocheuses en Ligurie, en Sicile, à Malte. En Croatie, des prélèvements ont été réalisés dans des substrats rocheux et meubles. Ces opérations ont permis de caractériser les communautés étudiées en termes d'abondance, de biodiversité, de distribution et de morphologie. Outre les espèces-clé précitées, les équipes ont collecté des données relatives à plusieurs espèces invasives – crabes en Croatie, moules en Sicile et en Italie. Grâce à des protocoles de mesure et de manipulation *in situ* des animaux, le projet a également relevé des paramètres physiologiques (rythme cardiaque, rapidité de croissance) et comportementaux.

En complément, des études en mésocosme ont permis de quantifier finement, pour différentes températures, les taux de respiration, d'alimentation et d'excrétion des clams, moules, patelles et éponges intertidales.

Ces travaux complémentaires, engagés dans un contexte de grand pauvreté de la littérature existante sur le sujet, ont récolté

**Figure 6.** Image satellite des sites d'étude du projet INTERMED



**une quantité considérable d'informations neuves.** De grand intérêt potentiel pour la science et la gestion, ces apports ouvrent la voie à des études intégrées ultérieures. Plusieurs articles consacrés à ces avancées ont déjà été publiés ou acceptés pour publication, d'autres sont en préparation. Des résultats préliminaires ont également été largement diffusés lors de conférences internationales ou dans la presse.

Globalement, les résultats suggèrent que le changement climatique – notamment l'accroissement attendu de la température – aura des impacts sur l'intertidal méditerranéen en altérant la physiologie de plusieurs espèces-clés et en favorisant des espèces exotiques envahissantes. Étant donné le rôle écologique majeur joué par la plupart des espèces étudiées, de tels impacts pourraient avoir des effets en cascade sur l'ensemble du milieu.

### *Premières modélisations, nouvelles interrogations*

Les apports d'INTERMED ont également conduit à la première utilisation pour la Méditerranée d'un modèle numérique complexe permettant la simulation de l'impact de scénarios climatiques sur les écosystèmes, qui nécessite en entrée un jeu de données étendu, des paramètres environnementaux au comportement des espèces. Les premières analyses envisagent des scénarios d'évolution très perturbée des milieux, par rapport à une situation actuelle déjà non pristine. Cependant, compte tenu de l'étroitesse de l'estran méditerranéen, le déferlement des vagues pourrait agir comme un facteur de mitigation des effets attendus. Alors que le modèle est encore en cours d'optimisation, ce point mérite une

analyse poussée pour comprendre les effets à venir du changement climatique sur ce domaine spécifique. De nombreuses questions restent sans réponse. Si la faible largeur de la bande intertidale méditerranéenne peut lui conférer une moindre exposition aux effets du changement climatique, elle peut d'autre part constituer un facteur de fragilité pour des écosystèmes aux milieux fragmentés : selon les scénarios, certaines espèces seraient capables de migrer ou de s'adapter, d'autres non.

### *Services économiques : une champ de recherche à investir*

Sur le versant socio-économique, le premier apport d'INTERMED a été la rédaction d'un article, accepté pour publication, qui établit la quasi-absence de travaux antérieurs consacrés aux enjeux de l'intertidal méditerranéen : aucune évaluation n'a été trouvée pour l'intertidal rocheux, et seul un petit nombre de travaux font référence au substrat meuble.

Une analyse statistique des perceptions de la mer par le public a été menée, sur la base de données collectées dans le cadre d'un projet de l'Union européenne ré-analysées dans la perspective d'INTERMED. Celle-ci a mis en évidence un fort attachement du public au domaine marin, indépendamment de l'âge, du sexe, du niveau d'éducation ou de l'origine. Elle a également souligné une grande méconnaissance des systèmes marins, des sciences et techniques de la mer et des bénéfices qu'elles peuvent générer.

À l'appui de cette analyse, INTERMED a ensuite identifié deux grandes catégories d'acteurs en lien avec l'intertidal méditerranéen : les utilisateurs (touristes, résidents,

professionnels) et les gestionnaires environnementaux. Les premières investigations auprès de ces acteurs, menées en Israël et en Croatie, ont cherché à établir leurs perceptions, usages et préoccupations à propos de l'habitat en question. Elles ont constaté un faible niveau de compréhension et d'implication. L'identification par les personnes interrogées des bénéfices apportés par la bande intertidale (et des services associés) s'est également avérée difficile. En l'absence complète de bases solides pour nouer un dialogue productif à plus large échelle, INTERMED a dû renoncer à mener une analyse formelle des jeux d'acteurs, comme cela était proposé initialement.

Les services économiques rendus par la zone intertidale découlent de son fonctionnement écologique : la poursuite des travaux entrepris pour la compréhension de ce fonctionnement constitue donc un premier axe de travail essentiel en vue d'une véritable prise en compte de ce milieu. En parallèle, l'identification exhaustive de l'ensemble des bénéfices et services économiques qu'il apporte doit être entreprise. INTERMED a initié ce travail, et proposé un agenda de recherche dédié à l'évaluation économique de ce compartiment.

## 2.3 – Impacts sur les eaux de transition

Les eaux de transition – estuaires, lagunes, zones humides et lacs côtiers – jouent un rôle écologique et économique prépondérant dans le bassin méditerranéen. Leur bon fonctionnement est une condition fondamentale pour la ressource en eau, la production vivrière – aquaculture, élevage, agriculture – et la biodiversité qu'elles abritent. Cette importance stratégique se traduit par une prise en compte croissante dans les politiques publiques, à l'image de la Directive cadre sur l'eau adoptée par l'Union européenne en 2000, qui identifie les masses d'eau de transition comme une catégorie spécifique pour l'évaluation de l'état des eaux.

À la confluence des enjeux sociétaux, ces écosystèmes complexes subissent des pressions anthropiques importantes, parfois amplifiées par une gestion inappropriée. Ce constat, conséquence d'une conscience limitée des impacts du changement global sur les eaux de transition, témoigne d'une collaboration insuffisante entre scientifiques et gouvernance locale.



### 2.3.1 – Vulnérabilité et pistes d'adaptation pour trois sites représentatifs

Le projet MEDCODYN a mobilisé, deux années durant, des équipes scientifiques italiennes, françaises et marocaines autour de trois sites naturels représentatifs de la variété des eaux de transition méditerranéennes : l'étang de Vaccarès, qui s'étend sur 6500 ha au coeur du delta du Rhône ; les lagunes du parc national de Circeo, à 100 km au sud de Rome, et le lac côtier de Sidi Boughara, près de Kenitra au Maroc.

Pour chacun de ces écosystèmes, le projet s'est nourri sur le terrain **d'un dialogue régulier entre les partenaires et les parties prenantes** locales ou nationales pour travailler selon trois objectifs :

- La collecte et la synthèse des informations disponibles au sein d'une base de données centralisant des paramètres biochimiques et climatiques ;
- Une analyse de vulnérabilité de ces écosystèmes côtiers au moyen de modèles numériques ;
- L'identification de mesures d'adaptation au changement climatique.

#### *Base de données : un outil opérationnel*

La structure de la base de données MEDCODYN a été finalisée en mai 2009. Depuis, la base de données est disponible sur Internet : [www.medcodyn.unisi.it](http://www.medcodyn.unisi.it). Tout au long du projet, l'équipe de recherche l'a enrichie de l'ensemble des données disponibles pour un grand nombre de paramètres : changements dans les stocks de poissons, les populations d'oiseaux, le pH, la salinité, l'oxygène dissous, la vitesse du vent, la température de l'air et de l'eau et les précipitations. Cet outil a ensuite été utilisé pour analyser les ten-

## MEDCODYN

*Caractérisation de la vulnérabilité des écosystèmes côtiers aux changements climatiques et anthropiques. Exploration de mesures d'adaptation*

### Organismes financeurs

- MEDDTL Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
- IMELS Italian Ministry for Environment, Land and Sea

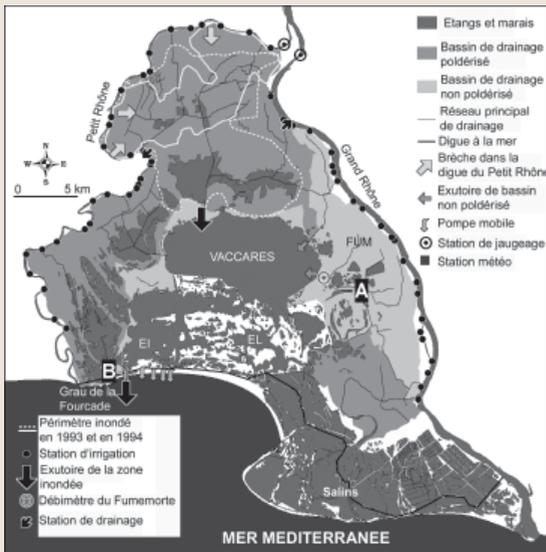
### Organismes partenaires

- UNISI\_CSGI Università di Siena, Dipt. Di Scienze e Tecnologia Chimiche e dei Biosistemi
- UC University Aïn Chock of Casablanca
- TdV La Tour du Valat
- CRA\_LCI Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Laboratorio Centrale di Idrobiologia

dances temporelles dans les paramètres chimiques, biologiques et physiques des trois sites d'étude.

#### *Prospective participative et modélisation : deux approches complémentaires*

Afin d'orienter au mieux les outils d'évaluation développés dans le projet, des ateliers de prospective participative ont été organisés à Sabaudia (Italie, décembre 2008) et à Mehdiya (Maroc, juin 2009), avec la participation active des parties prenantes, des opérateurs et des chercheurs. Une approche SWOT (Forces-Faiblesses, Opportunités-Menaces) a été utilisée, dans l'objectif d'aller vers un scénario optimal pour 2050 au regard de la gestion passée. Plusieurs scénarios intermédiaires ont été identifiés. Pour l'étang du Vaccarès, une série de réunions avec les décideurs régionaux et les associations ont été tenues en 2009 et 2010. Ces exercices ont permis d'identifier des menaces souvent communes aux trois écosystèmes (changements climatiques, surexploitation du bassin versant et mauvaise coordination entre les scientifiques et les décideurs). Cependant, des différences claires sont apparues dans les contextes politiques et socio-économiques des trois sites.



**Figure 7.** Cartographie l'hydrosystème de Vaccarès : bassin versant, réseau de drainage, digues et interfaces.

Pour analyser, dans les différentes options de gestion envisagées, les impacts potentiels du changement climatique sur les écosystèmes, le projet s'est doté de plusieurs **outils de simulation numérique dédiés**. Les chercheurs de la Tour du Valat et du *Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura* (CRA) ont collaboré pour le développement de modèles hydrodynamiques pour l'étang de Vaccarès et le site de Fogliano. Pour ce dernier, un modèle d'oxygène dissous a également été développé par le CRA afin d'étudier les impacts de changements de la température de l'eau, des échanges lac/mer, l'impact du vent et de la charge en matière organique sur les teneurs en oxygène dans la colonne d'eau et le sédiment, considérant plus particulièrement l'anoxie. Un modèle photo-dégradation/matière organique a été développé par l'Université de Sienna pour les trois sites, sur la base des données actuelles de conditions optiques mesurées dans chaque écosystème et d'une estimation des changements en couverture nuageuse jusqu'en 2050.

Pour Sidi Boughaba (Maroc), le manque de données historiques a rendu difficile la modélisation et l'analyse des tendances. Les chercheurs de l'UC avec ceux de la TdV, CRA et UNISI ont en revanche réalisé une analyse poussée des conditions locales en mai 2009. Ces mesures ont été alors utilisées pour définir un plan de suivi à long terme afin d'étudier les tendances mensuelles dans des caractéristiques écologiques, hydrologiques et chimiques clés du lac.

L'intérêt des travaux menés dans le cadre de MEDCODYN ne se limite pas aux trois sites étudiés. Les approches suivies pour la définition des scénarios et les méthodologies développées pour en analyser les conséquences sur les paramètres et les services écosystémiques sont largement applicables dans le bassin méditerranéen. Les forçages environnementaux et socio-économiques identifiés sont communs à de nombreux écosystèmes aquatiques de transition dans la région, également confrontés à des problématiques liées à l'oxygène dissous, à la salinité élevée ou à l'hydrodynamique.

## 2.3.2 Cas des lagunes : un inventaire complet en Méditerranée et en Mer noire

En parallèle de MEDCODYN, le projet CLIMBIOMEDNET s'est intéressé au cas spécifique des lagunes, dressant un inventaire complet qui a abouti à la plus grande base de données disponible à ce jour pour ces écosystèmes. Une revue préalable des connaissances existantes pour la thématique de la biodiversité lagunaire a montré le manque d'intégration entre les disciplines – biologie, écologie, socio-économie – entre les échelles de temps envisagées et entre les différentes approches nationales et locales. Les travaux de CLIMBIOMEDNET se sont d'abord orientés sur le développement d'une base théorique intégrant ces connaissances dans un cadre méthodologique, conceptuel et lexical commun. Ce travail s'est appuyé sur deux ateliers d'une durée de trois à quatre jours, réunissant des contributeurs invités ayant des compétences complémentaires et des membres de l'équipe scientifique du projet : écologues, sociologues, économistes, modélisateurs, juristes.

Ces rencontres fécondes ont permis de mettre en évidence des paradoxes (faible biodiversité mais forte productivité) et des tendances communes (dominance des espèces généralistes) pour les systèmes lagunaires méditerranéens. Ils ont notamment montré la nécessité d'intégrer dans le périmètre du projet les paramètres abiotiques des bassins versants.

Sur ces fondations, les équipes ont collecté des données biologiques (listes d'espèces) et physico-chimiques (salinité, température) pour les 635 lagunes inventoriées – dont la répartition par pays est détaillée en figure 8.

## CLIMBIOMEDNET

*Influence du changement climatique sur la biodiversité, les biens et services des lagunes méditerranéennes*

### Organismes financeurs

- MEDDTL Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
- CII Galicia Consellería de Innovación e Industria – Xunta de Galicia

### Organismes partenaires

- University of Vigo University of Vigo, Dep. De Ecologia y Biología Animal
- University of Tirana Faculty of Natural Sciences of Tirana University, Dept. of Bio-technologies
- INA Institut National Agronomique de Tunisie, Laboratoire écosystèmes et ressources aquatiques
- Ecolag University of Montpellier, Laboratoire "Écosystèmes lagunaires"
- DISTeBA University of Salento, Dip. Scienze e Tecnologia Biologica ed Ambientali

Celles-ci se caractérisent par leur faible superficie moyenne : 314 d'entre elles ont des surfaces inférieures à un kilomètre carré.

**Figure 8.** Répartition par pays des lagunes inventoriées par CLIMBIOMEDNET

Continent	Pays	Nombre de lagunes
<b>Afrique</b>	Algérie	13
	Egypte	7
	Lybie	16
	Maroc	12
	Tunisie	28
<b>Total Afrique</b>		<b>76</b>
<b>Asie</b>	Syrie	2
	Turquie	66
<b>Total Asie</b>		<b>68</b>
<b>Europe</b>	Albanie	16
	Bulgarie	1
	Croatie	10
	France	59
	Grèce	36
	Italie	244
	Monténégro	3
	Roumanie	2
	Slovénie	4
Espagne	116	
<b>Total Europe</b>		<b>491</b>
<b>Total</b>		<b>635</b>

La recherche de données, à vocation d'exhaustivité, a porté sur l'ensemble des publications disponibles des 25 dernières années. Un effort considérable a été consenti pour harmoniser la toponymie des lagunes, et fixer la dénomination des espèces mentionnées au regard des bases de données taxonomiques internationales. Un contrôle scrupuleux de la qualité des données récoltées a permis d'écarter toutes les publications originales entachées d'erreurs. Au final, la base de données intègre pour chaque lagune des informations géographiques, physiologiques, des paramètres abiotiques de l'eau et des sédiments, des données sur le bassin versant – utilisation des terres, pressions – des relevés climatiques ainsi que des projections issues des scénarios A1B, B1 et A2 du GIEC (température de l'air et précipitations).

Cette base de données, la plus complète jamais assemblée sur ce sujet, a été conçue comme un outil opérationnel de support à la décision. Accessible en ligne, [www.cirlemednet.unisalento.it](http://www.cirlemednet.unisalento.it), elle offre un accès public à l'inventaire des lagunes et des

espèces, et propose aux utilisateurs autorisés des fonctionnalités avancées d'extraction et d'analyse de données, couplées à un système d'information géographique.

Les observations menées par les équipes du projet ont montré que la plupart des espèces répertoriées sont rares : la moitié d'entre elles n'ont été repérées que dans une lagune. La biodiversité des lagunes côtières méditerranéennes, et les impacts qu'y induira le changement climatique se caractérise par une répartition hétérogène. Des analyses effectuées à l'échelle régionale, pour 32 lagunes de la côte italienne, ont par ailleurs mis en évidence un décalage entre les efforts consentis pour la conservation et le statut écologique des milieux au regard de la richesse de leur faune macro-invertébrée. De manière générale, il apparaît indispensable de consolider et de mieux cibler les politiques de préservation de ces milieux fragiles. Dans le cas du scénario A2 du GIEC, la température de la surface de la mer en face des lagunes côtières connaîtra un accroissement de 0,1°C au milieu du siècle, et 1,2°C



**Figure 9.** Capture d'écran du système d'information géographique couplé à la base de données CLIMBIOMEDNET.

à la fin du siècle. Le réchauffement le plus important aura lieu dans la mer Adriatique et en particulier sur la côte croate, où un accroissement de 2,5°C est attendu.

Dans ce contexte, la base de données construite dans le cadre de CLIMBIOMED-NET fournit un outil de choix aux équipes de recherches travaillant sur les lagunes et le changement climatique. Elle permet d'accéder à des informations utiles pour proposer de nouveaux projets et obtenir des financements. Elle apportera un éclairage objectif aux discussions souvent complexes qui prévalent à l'identification des zones protégées. Ce sera notamment le cas dans le cadre du projet européen Lifewatch, qui démarre en 2012 avec l'objectif d'anticiper les impacts du changement climatique sur le fonctionnement et la biodiversité des lagunes méditerranéennes et d'identifier les zones de conservation prioritaires.

## 2.4 – Impacts sur les nappes phréatiques et les écosystèmes dépendants

Les nappes phréatiques côtières constituent un enjeu majeur pour l'alimentation en eau potable des populations locales, pour l'irrigation, mais aussi pour les équilibres des écosystèmes de surface qui en dépendent. Pour ces masses d'eau stratégiques, l'avènement du changement climatique est une source d'inquiétude croissante à plusieurs titres : les modifications annoncées de la pluviométrie affecteront la balance recharge-prélèvements des nappes, tandis qu'elle pourraient accroître dans le même temps les besoins sociétaux en eau – par le fait d'une irrigation accrue notamment. De plus l'élévation du niveau de la mer pourrait majorer le risque d'intrusions salines dans les nappes.

## CLIMWAT

*Caractérisation et gestion des impacts du changement climatique sur les nappes phréatiques côtières et les écosystèmes dépendants*

### Organismes financeurs

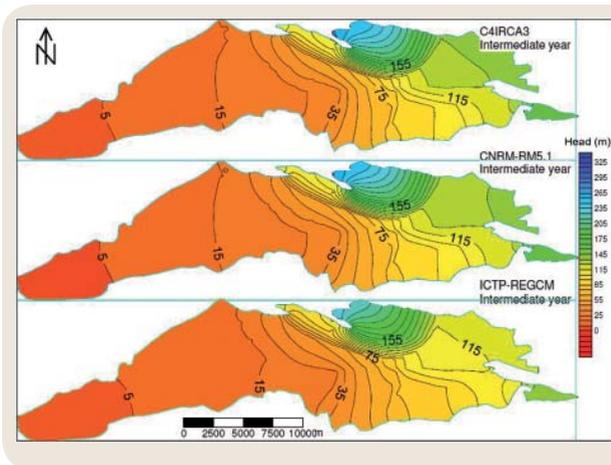
- *FCT Foundation for Science and Technology - Ministry of Sciences, Technology and Higher Education*
- *CII Galicia Consellería de Innovación e Industria – Xunta de Galicia*

### Organismes partenaires

- *FSSM - UCAM Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad*
- *DTC/UDC Dept. de Technoloxía da Construción, Universidad da Coruña*
- *CVRM/Geosystems Centre CVRM/Geo Systems Centre, Instituto Superior Technico/Universitare do Algarve*
- *CEHIDRO, IST CEHIDRO, Instituto Superior Técnico*

Dans ce contexte, le projet CLIMWAT s'est donné pour objet l'étude des impacts du changement climatique sur les nappes phréatiques de trois systèmes côtiers : en Algarve centrale, dans le delta de l'Èbre et sur la côte du Sahel atlantique.

Ce travail s'est appuyé au préalable sur une caractérisation fine (topographie, température, pluviométrie, fonctionnement hydrologique) des sites d'étude, tous marqués par la présence d'importants aquifères exploités pour l'eau potable et l'irrigation, et communiquant par ailleurs avec des zones humides de surface qui constituent autant d'écosystèmes dépendants des nappes en question. Dans le cas de l'Algarve centrale et du Sahel atlantique, ces zones humides reçoivent également des apports d'eau de mer, via des zones de transition entre eau douce et eau salée bien connues.



**Figure 10.** Cartes des niveaux piézométriques de la nappe de Quença-Silves pour trois scénarios distincts, obtenues selon la méthode de Penman-Grindley.

Le projet a utilisé un faisceau de projections climatiques issu du projet européen ENSEMBLES, qui fournit des données pour la période 1950-2100 avec une bonne résolution spatiale (25x25 km) et couvre les trois sites d'étude retenus. Il s'est concentré sur le scénario d'émissions A1B du GIEC, considéré comme intermédiaire et équilibré. Différentes méthodes de « descente d'échelle » ont ensuite permis aux équipes du projet d'affiner les données de température et de précipitation pour prendre en compte au mieux les conditions locales. Sur la base de ces données, des scénarios d'infiltration de surface et de recharge des nappes ont été développés au moyen de différents outils – calculs de flux d'eau par les méthodes de Thornthwaite-Mather et Penman-Grindley, modèles hydrologiques avancés pour les sites espagnol et portugais.

Les aquifères ont été modélisés par sections horizontales et verticales, et alimentés par les différents jeux de données climatiques. Les calculs réalisés ont délivré des projections pour l'évolution de la recharge de l'aquifère, l'évolution des besoins en eau d'irrigation, et l'élévation du niveau de la mer.

### *Tendances fortes et effets site-spécifiques*

Tous les scénarios concluent à une hausse significative de la température. Celle-ci serait comprise entre 1,1 et 2,6°C à l'horizon 2060, et entre 2,8 et 5,3°C à l'horizon 2100. Les réchauffements les plus importants sont attendus sur les sites portugais et espagnol, et seront plus prononcés de la fin du printemps à l'automne. Sur la côte du Sahel atlantique, l'accroissement serait mieux réparti au cours de l'année.

Les projections de précipitations annoncent des variations plus contrastées sur les trois sites. Au Maroc et au Portugal, les pluies se concentreront de novembre à janvier, et la réduction quantitative sera comprise entre -12 et -40% pour la période 2071-2100. Dans le delta de l'Èbre, l'évolution sera plus modérée (entre -7 et -13%). Les projections en terme de recharge des nappes suivent globalement ces orientations, avec une réduction plus marquée sur la période 2071-2100 pour les trois systèmes. Les tendances sont fortes, compte tenu du caractère modéré du scénario A1B considéré : de -9 à -25% dans le delta de l'Èbre, -7 à -38% pour l'Algarve

centrale, - 38 à -48% sur la côte du Sahel atlantique. Dans le delta de l'Èbre, où l'infiltration des eaux de surface utilisées pour l'irrigation contribue significativement à la recharge des nappes, les valeurs varient spatialement selon la présence de ce type d'activités. Inversement, dans les zones où les nappes fournissent l'essentiel de l'eau d'irrigation, le développement de systèmes d'irrigation plus performants apparaît indispensable, dans un contexte de hausse annoncée des besoins en eau de l'agriculture.

Si les sites ne connaissent pas actuellement de problème majeur de salinisation des nappes, des épisodes de sécheresse marquée entraînent déjà une forte réduction des quantités d'eau apportées par les aquifères aux zones humides dépendantes. Cette tendance va se confirmer. À l'horizon 2100, les calculs prédisent des baisses du niveau supérieur des aquifères comprises entre 5 et 20 m pour la majeure partie des systèmes considérés, avec niveaux piézométriques localement descendus de 100 m par rapport aux côtes actuelles dans le delta de l'Èbre et en Algarve centrale.

Partout où existent des interfaces eau salée-eau douce, **des phénomènes d'intrusions salées se produiront** de manière saisonnière, et seront bien plus fréquents sur la période 2071-2100. À court terme (avant 2050), la tendance est moins évidente et les incertitudes élevées. Elle est toutefois amplifiée dans les scénarios intégrant une croissance de l'irrigation – sauf sur le site espagnol où, comme on l'a vu, cette dernière est principalement prélevée dans les eaux de surface.

Dans le cas de l'Algarve centrale, des simulations avancées, prenant en compte les incertitudes liées aux différentes approches de



calcul de la recharge, ont donné des résultats contrastés quant à l'ampleur et à la durée des inversions de gradient qui entraînent les intrusions salées. Cependant, ils s'accordent à montrer un abaissement global du niveau des nappes. Les eaux salées pénétreront les nappes sur plusieurs kilomètres, affectant la qualité de l'aquifère et compromettant son utilisation pour les besoins humains. De plus, leur reconstitution lors des années pluvieuses sera lente et difficile.

### *Écosystèmes dépendants : vers des bio-indicateurs*

Une inquiétude partagée pour les trois sites étudiés concerne la réduction annoncée de l'apport d'eau douce aux zones humides dépendantes des aquifères. Le projet CLIM-WAT s'est proposé de développer un outil d'évaluation biologique pour caractériser la réponse de ces écosystèmes aux évolutions de l'apport des nappes. Pour ce faire, des campagnes d'échantillonnage de la faune invertébrée ont été menées sur les sites marocains (dix stations) et portugais (cinq stations), aux interfaces entre la nappe et la masse d'eau superficielle. Ces opérations ont permis d'établir la composition de la

faune et les paramètres physico-chimiques correspondants – dont la salinité. Au total 6 784 organismes ont été inventoriés. Certains taxons ont été identifiés comme des **bio-indicateurs potentiels** de la qualité des eaux souterraines. Cependant le grand nombre d'espèces endémiques qui caractérise ce type de faune limite la validité des modèles que l'on pourrait en tirer au niveau régional. En outre, au Maroc, l'absence de certains taxons sensibles dans certaines stations est probablement due aux impacts de polluants agricoles et d'autres activités humaines.

Les équipes de CLIMWAT ont ensuite identifié les taxons les plus susceptibles de profiter ou au contraire de pâtir d'une réduction des apports d'eau douce sous l'effet couplé du changement climatique et de prélèvements anthropiques plus importants sur les nappes. Les analyses statistiques faites ont confirmé l'intérêt de l'étude des

communautés biologiques de ces zones de communication entre aquifère et estuaire pour l'évaluation des effets du changement climatique sur des écosystèmes aquatiques clés.

Au final, ces travaux, les premiers consacrés à l'étude de la faune invertébrée aux interfaces estuaire-nappe dans une perspective de bio-indication, ont débouché sur la construction d'une grille d'analyse et d'un premier outil qui permet des simulations d'évolution de la composition en fonction de la salinité.

Sur la base de ces résultats, il est maintenant nécessaire de mettre en oeuvre des programmes de suivi pour consolider les outils de bio-indication proposés et permettre une compréhension plus avancée des évolutions de la salinité et de ses impacts sur les communautés invertébrées, au Maroc comme au Portugal.



Puits à Oualidia, Maroc  
© Tibor Stigter

## 2.5 – Impacts sur les bassins versants côtiers

Les bassins versants (BV) côtiers méditerranéens, enclaves fertiles au sein d'environnements souvent arides, constituent des zones de forte pression anthropique. Des tensions importantes s'y exercent pour l'usage de ressource en eau ou l'exploitation des surfaces cultivables ou constructibles. La détermination des effets à venir du changement climatique sur ces systèmes ne peut donc être découplée de l'étude des changements qui s'y produiront dans l'utilisation des terres. C'est cette analyse croisée, suivie de la mise au point d'un outil d'aide à la décision utilisable par les parties prenantes locales, que s'est proposé de mener le projet WATERKNOW sur trois sites aux caractéristiques très différentes. Le bassin de Quinto (Italie), petit BV poldérisé de 100 km<sup>2</sup> est dominé par l'agriculture – irriguée par un réseau de drainage – et l'exploitation de carrières. Beaucoup plus étendu, le bassin de Tahaddart (Maroc) couvre plus de 1145 km<sup>2</sup> et se caractérise par une agriculture non irriguée et la présence de vastes bassins de rétention, destinés à l'alimentation en eau de l'agglomération de Tanger. Enfin l'île de Terceira, dans l'archipel des Açores (Portugal) s'étend sur 640 km<sup>2</sup>. Soumise à un climat très pluvieux (entre 1000 et 3000 mm annuels), elle recèle des cultures et des pâturages.

Sur la base d'une caractérisation du fonctionnement actuel des systèmes (utilisation des terres, paramètres climatiques), le projet a utilisé les projections climatiques à l'horizon 2100 dans le cadre du scénario A1B du GIEC pour simuler les évolutions locales de l'hydrologie et calculer la disponibilité de la ressource en eau (ainsi que sa vulnérabi-

## WATERKNOW

*Gestion intégrée de l'eau dans les bassins versants côtiers : enjeux et stratégies d'adaptation face au changement climatique*

### Organismes financeurs

- MEDDTL Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
- IMELS Italian Ministry for Environment, Land and Sea
- FCT Foundation for Science and Technology - Ministry of Sciences, Technology and Higher Education

### Organismes partenaires

- USTL Université des Sciences et Technologies de Lille, Labo. Territoire, Ville, Environnement, Sociétés
- GGCN/DCA/UAC Gabinete de Gestao e Conservacao de Natureza de Depto de Ciencias Agrarias da Universidade dos Açores
- ENFI École Nationale Forestières d'Ingénieurs
- CIRSA Alma Mater Studiorum, Università di Bologna, Interdepartmental Centre for Environmental Sciences

lité aux intrusions salées) au regard de différents scénarios d'utilisation des terres.

La première phase du projet, menée par l'Université de Lille, l'Université de Bologne et l'École Nationale Forestière d'Ingénieurs du Maroc, a donc consisté à développer un **système d'information géographique** pour les trois sites d'étude. Dans le cas du bassin de Tahaddart, en l'absence de données existantes, ce point a donné lieu à une programmation d'acquisition d'image satellite sur l'année 2009, ainsi que des reconnaissances de terrain effectuées sur toute la durée du projet.

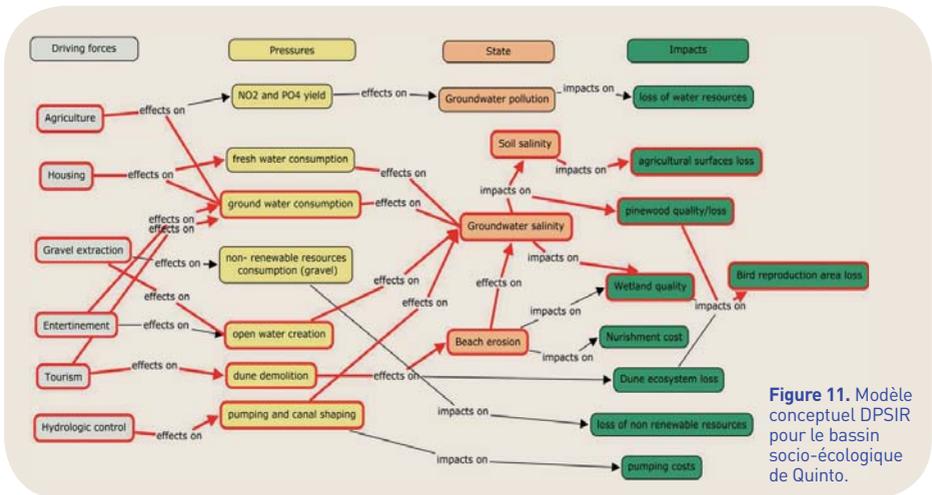
L'analyse du fonctionnement des bassins versants a été menée par différentes techniques. Une analyse SWOT (forces, faiblesses, opportunités, menaces) a été organisée pour le site italien avec des acteurs locaux. L'opération a permis d'identifier les intrusions salées et le manque de coordination entre les acteurs de la ressources en eau comme les principales

menaces pesant sur le système. La perspective du changement climatique est apparue éloignée des préoccupations des acteurs, focalisés sur des enjeux à plus court terme. Au Maroc, une analyse quantitative réalisée par l'équipe de l'Université de Lille 1 sur les images contenues dans les publicités diffusées par la filière touristique, acteur économique majeur, a livré des enseignements intéressants : les acteurs du tourisme ont révélé un fort attachement au maintien d'activités fortement consommatrices en eau – terrains de golf, espaces verts, piscines, etc.

Une fois la **base de données relationnelle** établie pour chaque site, un large éventail d'outils a été mobilisé pour simuler l'évolution des systèmes : modèle CROPWAT de la Food and Agriculture Organisation (FAO) pour le calcul des budgets d'eau, modèles hydrologiques et géochimiques couplés à des indicateurs de tendance de salinisation, ou encore modèles MODFLOW ou SEAWAT pour estimer la profondeur de l'interface eau douce – eau salée.

Ces simulations ont confirmé une tendance déjà constatée à la salinisation des eaux souterraines à Terceira comme à Quinto, et une dégradation globale des conditions hydroclimatiques pour les trois bassins dans le scénario A1B. Autre tendance importante, pour Tahaddart et Quinto, le taux d'évaporation accru pour les masses d'eau ouvertes se traduira par un préjudice significatif aux écosystèmes côtiers et une moindre disponibilité de l'eau potable.

Un **modèle d'interaction géographique** a été développé par l'Université des Açores et l'Université de Lille 1 pour réaliser une analyse cartographique de l'utilisation des terres au regard des caractéristiques géomorphologiques des bassins et des facteurs économiques locaux. Les cartes qu'il délivre fournissent un support pour concevoir des scénarios d'évolution de l'utilisation des terres, applicables ensuite aux modèles hydrologiques.



**Figure 11.** Modèle conceptuel DPSIR pour le bassin socio-écologique de Quinto.

## Un outil pratique d'aide à la décision

L'un des objectifs principaux du projet WATERKNOW était la construction d'un outil pratique d'aide à la décision, permettant aux gestionnaires locaux de prendre les meilleures décisions en termes d'utilisation des terres sur les questions relatives à la disponibilité de la ressource et aux risques d'intrusions salées, dans le contexte du changement climatique. Baptisé WATDSS, celui-ci a été développé dans un souci de simplicité d'emploi pour les utilisateurs non spécialistes. Reposant sur des fichiers (feuilles de calcul Excel), il permet d'importer les données de systèmes d'information géographique relatives aux trois bassins étudiés, chaque cellule correspondant à un carré de 100 mètres de côté. Il est composé de trois modules couplés, largement paramétrables, dédiés respectivement au changement climatique, à l'utilisation des terres, et au fonctionnement hydrogéologique. Il permet de générer en sortie des cartes montrant le budget en eau pour chaque scénario climatique et d'utilisation des terres envisagé. Très interactif, il recalcule rapidement les résultats lorsque l'utilisateur apporte une modification sur une cellule.

Cet outil (figure 12) a été utilisé par les équipes du projet pour étudier en détail la disponibilité de l'eau douce dans le BV de Quinto, au travers de différents scénarios climatiques et/ou d'utilisation des terres. Tous les scénarios se traduisent par une **réduction de la disponibilité de l'eau douce**. De manière inattendue, les scénarios les plus favorables du point de vue du climat sont les plus consommateurs en eau, du fait de l'accroissement des surfaces de forêt et de zones humides qu'ils supposent.



Plus généralement, il ressort des projections obtenues sur les trois bassins pour le scénario A1B à l'horizon 2070-2100 les observations suivantes :

- La disponibilité de l'eau douce sera impactée par une forte réduction des pluies hivernales – couplées, dans le cas de Tahaddart, à une très forte croissance de l'évaporation pendant l'été.
- Les événements extrêmes se multiplieront probablement à Terceira ; à Tahaddart il y aura une forte élévation du risque de sécheresse ; dans le bassin de Quinto les risques de sécheresse et d'inondation seront plus élevés.
- La vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salées s'accroîtra modérément dans certaines zones de Terceira, et dans une plus forte mesure dans la zone côtière et les forêts de pins du bassin de Quinto. Tout changement d'utilisation des terres, de l'agriculture irriguée vers une autre activité, se traduira par une vulnérabilité accrue.

Ces observations ont conduit les équipes du projet à formuler un faisceau de recommandations aux gestionnaires, présentées dans la section 3.1 du présent document.

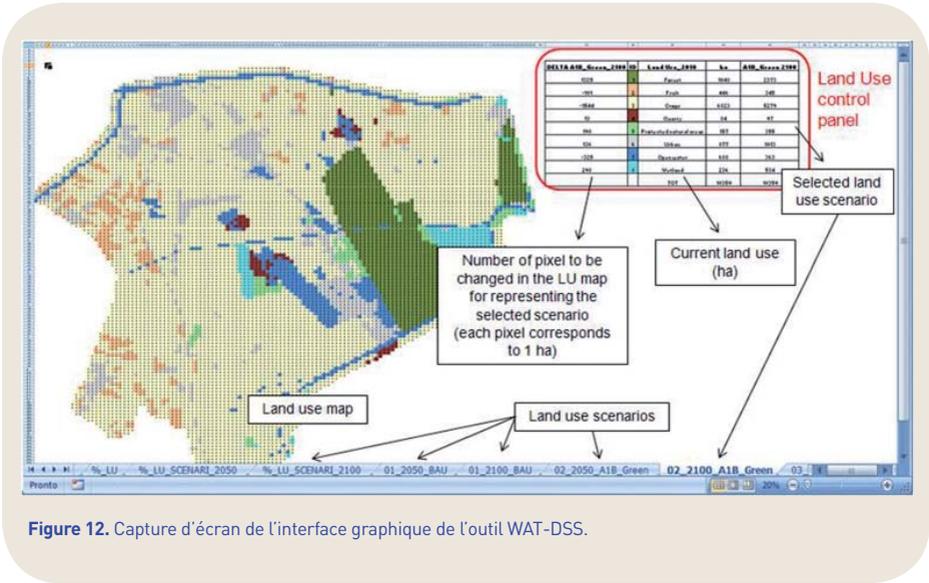


Figure 12. Capture d'écran de l'interface graphique de l'outil WAT-DSS.

## 2.6 – Vers une gestion intégrée : étude pilote dans le golfe de Gabès (Tunisie)

Les sections précédentes ont mis en évidence la multiplicité des impacts du changement climatique sur les différentes zones du littoral – écosystèmes marins, bande intertidale, lagunes, estuaires, nappes phréatiques côtières et bassins versants. Elles ont donné un aperçu des interactions complexes qui existent entre ces effets climatiques et les autres pressions anthropiques qui s'exercent sur l'environnement, et montré la nécessité de considérer, dans une perspective d'adaptation, les relations entre impacts environnementaux et conséquences socio-économique. La nécessité de prendre en compte à l'échelle régionale l'ensemble de ces défis pour mettre en oeuvre des politiques adaptées est à l'origine du concept de **Gestion intégrée de la zone côtière** (GIZC), «processus qui a pour objectif de réunir autour

### CANTICO

*Changement climatique et pressions anthropiques dans le golfe de Gabès : approche intégrée et priorisation des risques*

#### Organismes financeurs

- MEDDTL Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
- IMELS Italian Ministry for Environment, Land and Sea
- IMEP Israel Ministry for Environmental Protection

#### Organismes partenaires

- OGS Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale
- Météo-France CNRM Centre National de Recherches Météorologiques
- IPSL - CNRS Institut Pierre Simon Laplace
- IOLR Israel Oceanographic & Limnological Research
- INSTM Institut National des Sciences et Technologies de la Mer
- CMCC Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici

d'un même projet de développement durable des acteurs aux intérêts souvent divergents» ([www.developpement-durable.fr](http://www.developpement-durable.fr)).

Résolument transdisciplinaire, le projet CANTICO s'est donné pour objectif de réaliser cette double intégration, spatiale (l'ensemble de la zone marine et terrestre côtière) et des pressions (liées au changement climatique et aux activités anthropiques), à l'échelle du golfe de Gabès, en Tunisie.

La méthode a d'abord consisté à développer, sur la base d'outils existants, une chaîne de modèles permettant la simulation des effets locaux du changement climatique, et l'intégration aux calculs des pressions dues aux activités humaines sur la zone. Cette chaîne comprend des modèles globaux et régionaux de circulation atmosphérique et océanique (notamment ARPEGE Climat de Météo France et LMDZ du CNRS/ISPL), ainsi que des outils de simulation des processus biochimiques soumis aux forçages anthropiques. De nombreuses projections ont été réalisées à différentes échelles spatiales, sub-nationale, régionale et locale. Les résultats ont permis de caractériser, sous divers forçages, l'évolution présente et future de paramètres-clés (température, pluviométrie, niveau de la mer). Ils ont servi de base à la définition d'un faisceau de scénarios de «risque» locaux, aboutissant au développement d'une approche d'évaluation des risques régionaux (**Regional risk assessment**,

RRA) et à son application sur l'ensemble du golfe de Gabès.

### Prioriser les risques

Cette méthode a permis de générer un ensemble de cartographies de vulnérabilité, d'exposition et de risques : ces cartes de haute définition identifient les zones spatiales et les enjeux (plages, zones humides, zones agricoles, zones urbaines, écosystèmes marins ou terrestres, masses d'eau, zones protégées) les plus exposées à chaque impact climatique – élévation du niveau de la mer, crues ou inondation, érosion côtière ou dégradation de la qualité de l'eau, entre autres.

Parmi les nombreuses tendances obtenues, on peut par exemple relever que les plages et les zones humides sont les types de terrain les plus exposés à la fois à l'élévation du niveau de la mer et aux crues ; ces phénomènes sont par ailleurs attendus dans une plus grande mesure, du point de vue spatial, sur les rivages méridionaux du golfe et autour de l'île de Kerkenna. Autre enseignement : les impacts les plus importants sur la qualité de l'eau douce seront localisés à proximité des principales agglomérations et des infrastructures portuaires.

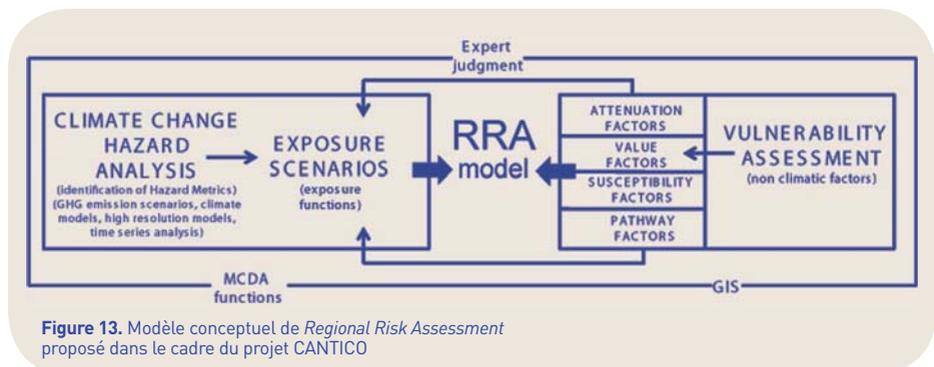


Figure 13. Modèle conceptuel de *Regional Risk Assessment* proposé dans le cadre du projet CANTICO

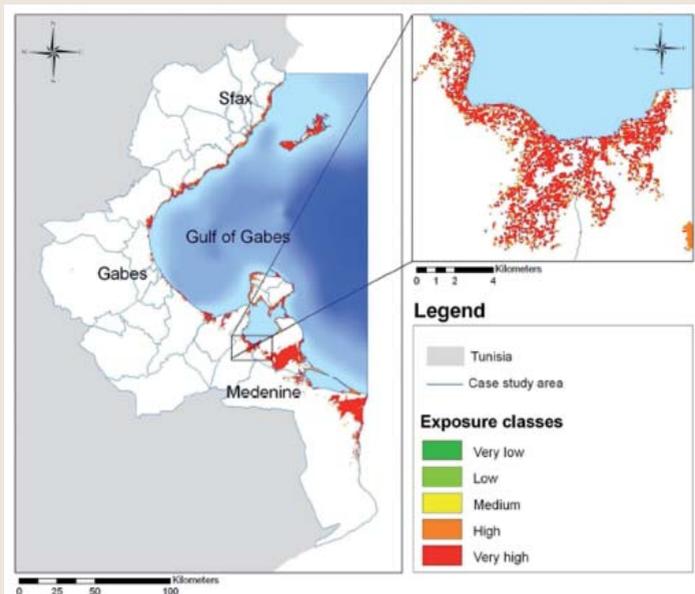


Figure 14. Cartographie d'exposition à la submersion marine dans le golfe de Gabès.

Le projet CANTICO a enfin amorcé un dialogue avec les gestionnaires locaux. Un effort d'information a été réalisé pour leur présenter la méthode et les résultats préliminaires. Une enquête réalisée auprès des décideurs a permis de mieux orienter les utilisations faites du modèle en fonction de leurs attentes, en vue de la préparation de mesures d'adaptation au changement climatique. Elle a notamment révélé que les

problèmes de qualité d'eau et d'érosion côtière étaient perçus comme les impacts les plus préoccupants, tandis que les plages et les activités touristiques étaient considérés comme les récepteurs les plus sensibles économiquement. De manière plus générale, cette analyse a confirmé la pertinence de la méthode RRA pour la gestion intégrée du changement global dans les zones côtières. ■



3

# Construire l'adaptation : outils et méthodes





Dans les chapitres précédents, il a été dressé un panorama des avancées scientifiques réalisées par les projets CIRCLE-Med pour la *compréhension* des impacts du changement climatique et des autres pressions anthropiques sur différents compartiments (zone intertidale, nappes phréatiques, lagunes...) du bassin méditerranéen. Une propriété fréquemment partagée par ces impacts est leur caractère site-spécifique : si les *méthodes* développées dans le cadre de CIRCLE-Med sont largement applicables, au-delà des périmètres étudiés, à un ensemble de sites comparables, les *résultats* obtenus ont mis en évidence le danger qu'il y aurait à extrapoler des tendances établies localement pour d'autres systèmes, même soumis à des contextes voisins.

Ce point, essentiel, rappelle le rôle prépondérant que joue la **composante locale** – caractéristiques propres des écosystèmes, du tissu socioéconomique, de la gouvernance – dans les effets attendus du changement global. De même, dans la perspective de l'adaptation, il démontre que les orientations de politique publique et les méthodes définies aux niveaux nationaux ou supra-nationaux ne peuvent déboucher sur des mesures efficaces que si elles sont déclinées localement.

Pour ce faire, la prise de conscience par les parties prenantes locales (gestionnaires, utilisateurs et société civile) des enjeux du changement climatique, et au-delà l'**appropriation** par ces acteurs des connaissances et des recommandations formulées par la recherche, doivent être facilitées. Autant que possible, la définition de mesures adaptatives locales doit être le fruit d'un dialogue régulier entre scientifiques et parties prenantes. Cette co-construction des politiques adaptatives, au niveau local, est garante de leur pertinence pour un contexte donné, et de leur mise en oeuvre dans la durée.

Favoriser la collaboration entre équipes scientifiques et parties prenantes locales est l'un des objectifs communs à l'ensemble des actions financées dans le cadre de l'ERA-Net CIRCLE. Chacun des projets de recherche présentés dans ce qui précède a intégré cette dimension, à différents degrés selon les cadrages initiaux et les possibilités découvertes sur place : de la formulation de recommandations à l'organisation d'ateliers participatifs ou au développement d'outils d'aide à la décision.

Cette troisième partie propose une synthèse des expériences entreprises au sein de CIRCLE-Med pour construire ce dialogue, des difficultés rencontrées localement et des interrogations qui en découlent. Elle présente enfin les éléments de réponse méthodologiques apportés par le projet AQUIMED, dédié à la construction de stratégies participatives pour l'adaptation au changement climatique.

### **3.1 – Quelles recommandations à la gestion ?**

Tous les projets CIRCLE-Med ont été menés dans un logique explicite d'appui à la décision : les problématiques retenues abordent le changement climatique sous l'angle de l'adaptation au changement climatique dans le bassin méditerranéen, laquelle implique classiquement la formulation de recommandations aux parties prenantes comme livrable de l'avancée des connaissances scientifiques.

En pratique, cette dernière étape a été menée à terme par plusieurs projets, ou simplement préparée, dans d'autres cas – les équipes scientifiques de CIRCLE-Med lais-

sant alors à leurs partenaires institutionnels locaux le soin d'assurer l'appropriation de leurs résultats par les parties prenantes. Cet état de fait prend son origine dans le cadre temporel contraignant imposé aux projets : les deux années imparties sont parfois apparues bien courtes au regard de l'étendue des tâches à mener.

#### ***ACIDBIV : les résultats en de bonnes mains***

Une recommandation commune à l'ensemble des projets CIRCLE-Med consiste bien sûr à encourager la sensibilisation de l'opinion au changement climatique et à ses impacts sur le bassin méditerranéen. Ainsi le projet ACIDBIV, consacré aux effets de l'acidification sur les bivalves, a consenti un effort conséquent à la valorisation et à la vulgarisation de ses résultats. Cette volonté s'est notamment traduite par des participations à divers événements académiques ou grand public ainsi que par l'organisation de 14 interventions dans des écoles, bibliothèques, lycées et centres de culture scientifique, accueillant chaque fois entre 50 et 100 personnes (des élèves au grand public).

Au-delà de cette volonté pédagogique, les équipes ont travaillé dans le souci constant de préparer, in fine, des recommandations opérationnelles aux parties prenantes – en particulier la filière aquacole. Le calendrier n'a pas permis de réaliser cet objectif de manière formelle. En revanche, des relations fécondes ont été nouées avec des organismes reconnus pour leur capacité d'action auprès des parties prenantes locales. C'est le cas notamment, au Portugal, de l'IPIMAR, entité de l'Institut national des ressources biologiques (INRB), dont l'engagement dans le projet ACIDBIV, formalisé par un protocole d'accord, permettra l'exploitation des outils

et des résultats obtenus au service des parties prenantes locales, régionales et nationales : associations de pêcheurs, coopératives aquacoles, municipalités.

### *INTERMED : inclure l'intertidal dans les agendas scientifique et politique*

Le projet INTERMED a généré une considérable moisson d'informations sur une thématique essentielle et jusqu'alors absente du champ de la recherche. Ses travaux se sont traduits par de nombreuses publications scientifiques remarquées. Ils sont synthétisés et vulgarisés, pour les décideurs politiques, sous la forme d'une brochure de 16 pages accessible en ligne.

Celle-ci souligne le sous-investissement actuel des problématiques liées à l'intertidal méditerranéen, au regard de l'importance écologique et socio-économique de ce milieu. Dans ce contexte, les apports du projet INTERMED pour la compréhension de son fonctionnement constituent une base précieuse en vue d'une véritable prise

en compte de ce milieu. Cet effort doit évidemment être poursuivi, sur le plan écologique mais aussi par l'identification, initiée dans la cadre du projet, des bénéfiques et services socio-économiques liés à la bande intertidale.

Au final, le projet formule **trois recommandations-clés** pour les décideurs et les politiques publiques, dont la validité s'étend à l'ensemble du bassin méditerranéen :

- L'intertidal doit être inclus dans l'agenda scientifique, et l'effort doit se concentrer en priorité sur le fonctionnement des écosystèmes et la connectivité avec les systèmes adjacents.
- L'intertidal doit être inclus dans l'agenda politique. Ses fonctions, bénéfiques et services doivent être évalués pour alimenter des stratégies de gestion adaptées.
- Des investissements doivent être consentis pour l'éducation et la sensibilisation du public aux questions liées à la mer, à son fonctionnement et aux recherches associées.



### **Projet MEDCODYN : du diagnostic aux recommandations**

Les résultats scientifiques du projet ont donné lieu à de nombreux articles, acceptés ou en cours d'évaluation par des revues internationales avec comité de lecture. Ils ont également été largement communiqués aux décideurs régionaux et européens au moyen de publications dans la presse spécialisée, et par des présentations dans des conférences internationales. L'apport de la modélisation, confronté aux conclusions des ateliers participatifs, a débouché sur l'identification de mesures d'adaptation à l'horizon 2050 en relation avec leur succès potentiel dans les contextes locaux et régionaux de changement global.

Ces propositions, résolument opérationnelles, sont propres à chacun des trois sites étudiés.

#### **Pour les lagunes Pontiques :**

- Option 1 : Modification des activités d'aquaculture (coquillages).
- Option 2 : Modifications hydrauliques des entrées d'eau douce et d'eau salée.
- Option 3 : Récolte des macrophytes aquatiques submergées.

#### **Pour l'Etang du Vaccarès :**

- Option 1: Réduction des entrées d'eaux de drainage agricoles dans le Vaccarès par un changements des pratiques (30% de réduction) ou une poldérisation (100% de réduction pour le bassin FUM).
- Option 2: Elargissement de la connectivité hydraulique entre le système lagunaire et la mer.
- Option 3 : Restauration d'une ancienne communication entre l'est du système lagunaire et la mer.

#### **Pour Sidi Boughaba :**

- Option 1 : Plan de suivi à long terme pour le lac et la zone humide .
- Option 2 : Plan de gestion du site prenant en considération les enjeux du bassin versant.

À l'échelle locale, le projet a permis d'établir des relations entre les chercheurs et les décideurs et parties prenantes, et la collaboration se poursuit désormais par différents moyens. Le réseau initial de chercheurs mobilisés par MEDCODYN s'est en outre étendu au sud de la région méditerranéenne : ce réseau élargi travaille déjà à développer d'autres projets de collaboration et à favoriser les échanges de connaissances.

### **WATERKNOW : un outil opérationnel, des recommandations locales**

Le principal apport à la gestion du projet WATERKNOW a été, comme vu en section 2.5, le développement d'un outil pratique d'aide à la décision : WATDSS, très simple d'usage pour des non-spécialistes, permet de simuler les effets de changements d'utilisation des terres en termes de disponibilité de l'eau douce et de risque d'intrusions salées, dans le contexte du changement climatique.

Les équipes scientifiques ont pu exploiter cet outil, ainsi que d'autres modèles mobilisés par le projet, pour formuler un ensemble de recommandations aux gestionnaires et utilisateurs de la ressource en eau, dont les idées directrices sont synthétisées ici :

- La problématique du stockage de l'eau sera essentielle pour les trois bassins étudiés : tout apport excédentaire devra être récupéré pour limiter les effets de probables inondations hivernales et sécheresses prolongées durant l'été.

- L'évaporation sera un problème sérieux pour les bassins de Tahaddart et Quinto. L'eau devra donc être stockée dans le sous-sol autant que possible : cela pourra être réalisé dans le cadre de projets de gestion de la recharge des aquifères, ou par l'emploi des techniques traditionnelles locales dans le cas marocain.
- Les conflits locaux entre parties prenantes devront être résolus : la mise en œuvre d'une planification à long terme est un impératif majeur pour les gestionnaires de l'eau.
- Les infrastructures hydrauliques existantes doivent être repensées : d'importants gains sont réalisables en termes de disponibilité et de qualité des ressources en eau douce moyennant des aménagements simples.

En Italie, la collaboration initiée avec les autorités régionales de distribution de l'eau d'Émilie-Romagne a permis de libérer des financements pour approfondir l'étude des possibilités locales de stockage de l'eau en réservoirs artificiels souterrains.

### Quelle appropriation par les parties prenantes ?

Ces recommandations, ainsi que les outils mis à leur disposition, doivent bénéficier dans la plus large mesure possible aux acteurs de terrain et aux décideurs politiques pour lesquels ils ont été développés. Cela vaut évidemment pour tous les projets CIRCLE-Med : la démarche de priorisation intégrée des risques impulsée par CANTICO pour le golfe de Gabès ; la base de données opérationnelle développée pour 635 lagunes dans le cadre du projet CLIMBIOMEDNET, ou encore la grille d'analyse livrée par le projet CLIMWAT pour le développement de la bio-



Discussion lors d'une visite de site à Ravennes, Italie (projet Waterknow)  
© Pauline Mollema

indication aux interfaces nappes-eaux salées, constituent autant d'apports précieux dont les parties prenantes doivent se saisir pleinement pour adopter les décisions les plus objectives face aux défis complexes du changement climatique.

Cette nécessité pose la question essentielle de l'*appropriation* des recommandations de la recherche par les parties prenantes. Récurrente dans les travaux liés à l'adaptation au changement climatique, cette problématique exige de dépasser la seule publication – vulgarisation des résultats : elle demande d'**impliquer les parties prenantes** dans le déroulement des travaux, par l'organisation de consultations, d'enquêtes de terrain, d'ateliers participatifs. Cette préoccupation a été partagée, comme cela a été montré dans ce qui précède, par l'ensemble des projets CIRCLE-Med – dans la mesure des moyens disponibles, du temps imparti, des spécificités de chaque thématique de recherche. Certains projets ont à ce titre mis en œuvre des expérimentations originales : il importe de tirer les enseignements des apports livrés par ces initiatives, mais aussi les difficultés rencontrées. La section suivante aborde ces retours d'expérience.



Réunion avec  
agriculteurs  
du Maroc  
(projet Aquimed)  
© Nicolas Faysse

### 3.2 – Mobilisation des acteurs locaux : retours d'expérience

La première difficulté constatée par les équipes scientifiques de CIRCLE-Med pour la co-construction de l'adaptation réside dans l'écart entre l'**horizon temporel** du changement climatique, situé à minima à plusieurs décennies, et les capacités d'action et de planification des parties prenantes (gestionnaires publics, et plus encore agriculteurs et autres acteurs économiques), qui excèdent difficilement quelques années. Ce point est par exemple souligné dans le rapport final du projet MEDCODYN : l'échéance de la prospective participative était établie à 2050, bien que les modèles développés dans le cadre du projet ont un potentiel qui va bien au-delà. La plupart des parties prenantes considèrent une échéance de 40 ans comme relevant du long terme, alors que la plupart des scénarios climatiques considèrent 2050 comme du moyen terme.

À cet écueil s'ajoute une **sensibilisation très inégale** des acteurs à la réalité du changement climatique et à la nécessité de s'y adapter dès maintenant. Dans le cas des agriculteurs, deux situations peuvent être schématiquement distinguées. Dans les zones déjà soumises à une forte tension pour la disponibilité de la ressource en eau douce, les variations actuelles du climat sont identifiées comme la contrainte première sur l'activité – et ont tendance à occulter la réflexion sur les évolutions climatiques à plus long terme. Inversement, dans les zones disposant d'une ressource suffisante, les questions liées à la gestion de l'eau sont perçues comme secondaires au regard des problèmes économiques et commerciaux qui frappent la profession au quotidien.

Une autre limitation rapportée par plusieurs projets concerne la prise de conscience aujourd'hui très insuffisante des **liens entre écosystèmes littoraux et services écono-**

**miques.** Ce point a été notamment mis en lumière par les consultations menées en Israël et en Croatie dans le cadre du projet INTERMED auprès des parties prenantes (pêcheurs et gestionnaires du littoral) : ces rencontres ont montré une grande méconnaissance des enjeux écologiques et économiques liés à la bande intertidale méditerranéenne, dont les équilibres conditionnent pourtant de nombreuses activités humaines – du tourisme à l’aquaculture ou à l’urbanisme. Un constat similaire a été dressé, dans une moindre mesure, dans le cas des eaux de transition et lagunes.

Face à ces difficultés, l’organisation **d’acteurs participatifs**, associant scientifiques, gestionnaires publics et parties prenantes locales dans une perspective de prise de décision autour d’un problème précis, s’impose comme un facteur de succès essentiel. Ces exercices remplissent d’abord une fonction de vulgarisation qui favorise la nécessaire prise de conscience des enjeux de l’adaptation. En retour, ils permettent aux équipes de recherche de se nourrir des connaissances et des données apportées par les acteurs de terrain, et de comprendre les besoins de chaque partie pour orienter la politique scientifique. Mais surtout, ils associent chaque partie prenante à l’élaboration de diagnostics ou de mesures opérationnelles : ils sont ainsi les garants du caractère consensuel des décisions, et donc de leur mise en oeuvre par les participants. Parmi les sept projets CIRCLE-Med déjà présentés, le projet MEDCODYN a choisi d’exploiter ce type d’approche prospective, au travers d’ateliers SWOT (en Italie et au Maroc) avec les acteurs de terrain, ou via des réunions associant décideurs locaux et associations (en France). Ces exercices ont notamment permis de préciser les menaces pesant sur

les trois écosystèmes étudiés, et d’identifier les besoins des acteurs en connaissances nouvelles.

Une analyse participative de type SWOT a également été menée par l’équipe du projet WATERKNOW auprès des acteurs de l’eau du bassin de Quinto (Italie). Là encore, l’exercice a livré des enseignements utiles (voir la section 2.5), mais trouve sa limite dans le faible nombre de participants : sur 34 acteurs invités, quatre seulement ont répondu présent, et deux se sont déclarés intéressés à poursuivre une collaboration. Ce faible taux de participation, écueil fréquent dans les perspectives participatives actuelles, est bien sûr à relier aux limitations déjà citées – prise de conscience naissante des enjeux de l’adaptation, problématique perçue comme lointaine et découplée des difficultés opérationnelles, manque de visibilité quant aux «bénéfices» à retirer de la démarche.

En creux, il souligne surtout le caractère encore expérimental et ponctuel des ateliers participatifs mis en oeuvre dans l’optique de l’adaptation, en l’absence de structures de concertation identifiées à cet effet sur le territoire. Plusieurs projets (INTERMED, WATERKNOW, MEDCODYN) ont ainsi relevé **l’inadéquation des structures de gouvernance locale** existantes à la résolution des conflits d’usage sur l’eau et à une réelle prise en compte des problématiques liées à l’adaptation. Les situations diffèrent d’un point à l’autre du bassin méditerranéen. Dans certains pays, notamment au Sud, les structures dédiées à la gestion de l’eau restent à construire, tandis qu’ailleurs, des outils existants (les SDAGE par exemple en France) pourraient être adaptés pour constituer une enceinte pertinente pour la co-construction des politiques d’adaptation.

### 3.3 – Projet Aquimed : des outils participatifs pour construire l'adaptation

Problématique encore récente, la nécessaire prise en compte par la société des travaux scientifiques menés sur le changement climatique fait apparaître un nouveau champ de recherche transdisciplinaire. À l'interface de l'écologie, de l'économie et des sciences sociales, le développement de stratégies et de méthodes participatives apparaît comme un enjeu majeur pour favoriser une véritable appropriation par les parties prenantes des enjeux de l'adaptation. Telle était l'ambition du projet AQUIMED, qui s'est donné pour objet d'étude la construction de stratégies adaptatives autour de trois aquifères côtiers méditerranéens distincts, en situation de surexploitation ou menacés de l'être. Ce projet, à forte composante méthodologique, a été conduit selon trois phases. Une analyse initiale, commune aux trois systèmes étudiés, a permis de caractériser la perception par la population locale des changements du climat et de la variabilité des ressources en eau. Plusieurs séries d'ateliers de prospective participative ont été conduites avec des groupes d'exploitants agricoles et des institutions locales en charge de l'agriculture et de la gestion de l'eau. Enfin, un réseau d'échange entre scientifiques et parties prenantes a été mis en place en France, au Maroc et au Portugal.

#### *Situation des trois sites d'études et enquête préliminaire*

Les trois sites considérés par le projet se caractérisent par des situations contrastées. En France, les travaux ont porté sur la **plaine de Roussillon**, où un aquifère multicouches s'étend sur 700 km<sup>2</sup> dans le département des

## AQUIMED

*Outils et méthodes participatifs pour la construction de stratégies d'adaptation au changement climatique d'aquifères côtiers méditerranéens*

### Organismes financeurs

- **MEDDTL** Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
- **FCT** Foundation for Science and Technology - Ministry of Sciences, Technology and Higher Education

### Organismes partenaires

- **SOCIUS** Research center in economic and organizational sociology
- **ENA** Ecole Nationale d'Agriculture
- **Cirad** Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
- **Cemagref** Sciences, eaux & territoires
- **BRGM** Geosciences for a sustainable Earth

Pyrénées-Orientales. Cette masse d'eau, soumise à une forte tension, est exploitée pour l'alimentation en eau potable, les activités touristiques et l'irrigation (vergers, cultures céréalières et viticulture). L'aquifère superficiel ayant été affecté par des pollutions diffuses, des couches plus profondes font l'objet d'une exploitation croissante par les collectivités locales et les exploitations agricoles, notamment du secteur maraîcher. Il en résulte une dégradation progressive de la balance recharge-prélèvements observée depuis 20 à 30 années. Celle-ci va vraisemblablement se poursuivre, dans un contexte d'accroissement de la population, et d'abandon progressif par l'agriculture des anciens canaux de drainage superficiels au profit de forages profonds. Face à cette situation, les autorités locales et les gestionnaires de la ressource ont activement soutenu la mise en œuvre d'une gestion concertée de l'eau à travers une procédure de SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux).

Au Portugal, les 318 km<sup>2</sup> de l'aquifère de **Querença-Silves** forment la nappe la plus importante de la région de l'Algarve, au Sud du pays. Elle est située dans une des zones les plus touristiques du littoral portugais : la population y est multipliée par dix au cours des mois d'été. Outre l'approvisionnement des hôtels, résidences secondaires et terrains de golf, cette ressource est également utilisée par l'agriculture (production d'agrumes essentiellement) et certaines industries. Au cours de l'été 2005, qui a vu le Portugal frappé par sa pire sécheresse depuis quarante ans, cet aquifère a connu le plus bas niveau de recharge jamais enregistré. Les autorités prirent alors des mesures exceptionnelles : restriction de 50 % des prélèvements sur l'aquifère et mise en place d'autres solutions d'approvisionnement en eau. Un tel épisode est annonciateur des difficultés à venir, au regard de l'accroissement annoncé de la demande domestique et touristique en eau. En 2009, l'Administration hydrographique d'Algarve a initié une démarche participative pour définir un plan d'utilisation concerté des ressources locales en eau superficielles et souterraines.

Le site marocain, enfin, est l'aquifère côtier de la **Chaouia**, situé entre les villes de Casablanca et Azemmour. Depuis les années 1970, cette nappe de 1200 km<sup>2</sup> a été exploitée intensivement pour l'irrigation : essentiellement la culture d'agrumes, mais aussi, de plus en plus, des cultures maraîchères comme la tomate ou la pomme de terre. La surexploitation de la ressource a conduit à des intrusions salines dans les nappes côtières (la conductivité de l'eau atteint par endroits 10 mS/cm), et à l'abaissement des niveaux piézométriques dans les nappes continentales. Les agriculteurs ont dû s'adapter à cette situation de stress



hydrique depuis les années 80, adoptant des stratégies variées : implantation plus profonde des captages, transport d'eau douce jusqu'à leur ferme ou location de terrains, soit en amont sur la même zone, soit dans des zones plus éloignées du littoral. La pénurie croissante d'eau souterraine utilisable a constitué le premier facteur qui a conduit la région, d'une agriculture d'exportation intensive, à la situation de crise et d'instabilité actuelle. Si aucun mécanisme de gestion de la ressource n'a encore été mis en place, les politiques publiques envisagent de soulager la tension sur la nappe par l'apport d'eau superficielle à certaines zones de l'aquifère, et d'encourager la transition vers des activités moins dépendantes de l'eau, telles que l'élevage volailler.

Une analyse préalable, menée sur les trois sites sous la forme d'une même enquête auprès des agriculteurs, a révélé dans tous les cas que ceux-ci ne perçoivent pas de changement majeur dans le climat. Pour chacun de ces sites, l'agriculture, principale consommatrice de la ressource en eau, connaît une situation de crise. Mais les contextes respectifs présentent deux divergences de taille. D'abord, dans le Roussillon

comme à Querença, la disponibilité de la ressource n'est pas à l'heure actuelle perçue comme une contrainte majeure pour les exploitants ; le changement climatique et la nécessité de s'y adapter apparaissent encore comme des perspectives lointaines. Inversement, dans le cas de Chaouia, la rareté de la ressource, aggravée par les problèmes de salinisation, constitue la principale contrainte pour l'agriculture. La seconde différence concerne les structures de gouvernance de l'eau. Une véritable gestion de l'eau émerge aujourd'hui dans le Roussillon et à Querença, tandis qu'elle n'est même pas encore planifiée à Chaouia. Cela se traduit par des écarts importants dans la capacité des institutions publiques à prendre en charge les problèmes liés au changement climatique dans une perspective à long terme.

### Quelles démarches participatives ?

À contextes différents, méthodes différentes. En France et au Portugal, des scénarios d'évolution de l'agriculture à l'horizon 2030 avaient été pré-construits, à partir des données locales et d'entretiens avec les

acteurs et des experts. Dans le Roussillon, trois groupes d'agriculteurs ont été formés et invités à débattre de ces scénarios. Les agriculteurs invités représentaient les différentes filières, des types d'exploitation variés (bio ou conventionnel, exploitation familiale ou entreprise), les différentes zones géographiques de la plaine et divers niveaux d'ancienneté dans le métier. Au Portugal, deux groupes d'agriculteurs ont été formés : l'un dans la région de Algoz (zone Ouest) et l'autre dans la région de Querença (zone Est). Des ateliers avec ces deux groupes d'agriculteurs ont permis de préciser les facteurs d'évolution et de nourrir les scénarios de développement agricole à l'horizon 2030.

Un protocole commun a ensuite été appliqué sur les deux terrains, où trois ateliers ont été réalisés avec chaque groupe. Durant le premier atelier, des scénarios d'évolution de l'agriculture à l'horizon 2030 ont été exposés et débattus. Lors du second, des données rétrospectives et prévisionnelles sur le climat ont été présentées ; leurs impacts sur les exploitations et la pertinence de mesures d'adaptations ont été discutées. Enfin, lors

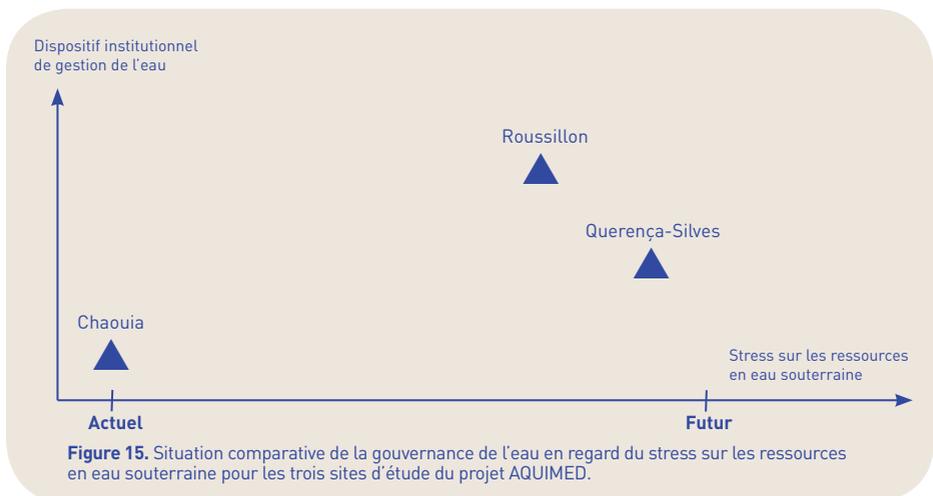
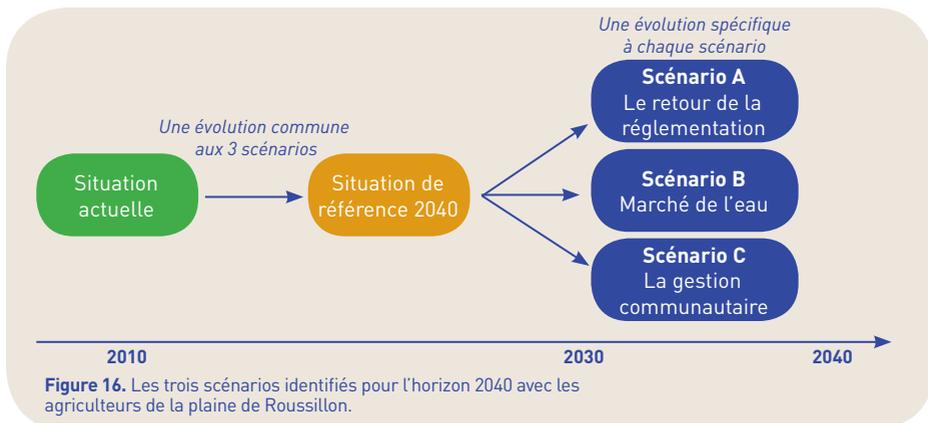


Figure 15. Situation comparative de la gouvernance de l'eau en regard du stress sur les ressources en eau souterraine pour les trois sites d'étude du projet AQUIMED.



du troisième et dernier atelier, trois scénarios possibles pour la gestion des eaux souterraines ont été présentés et discutés : un scénario d'intervention par l'état régalién, un scénario de «marché de l'eau» et un scénario de gestion communautaire.

Des ateliers ont aussi été organisés avec les institutions de développement locales dans la région de Querença-Silves, à la fois sur les scénarios de développement et sur l'impact du changement climatique. Un dernier atelier commun entre institutions et agriculteurs des groupes de travail a eu lieu à l'issue du projet.

Au Maroc, trois groupes d'agriculteurs ont effectué un diagnostic de leur zone, puis ont construit des scénarios pour les activités agricoles dans le futur et ont défini des actions possibles, au niveau de l'aquifère, pour pouvoir aboutir au scénario préféré. Un travail similaire a été effectué avec un groupe de personnels d'administrations en charge du développement agricole. Un atelier final a réuni ces différents groupes, qui ont comparé et discuté les analyses effectuées, les scénarios construits et les solutions proposées.

### *Bilan sur chaque site : des méthodes validées, des actions identifiées*

Les ateliers menés dans le Roussillon ont d'abord confirmé la capacité des agriculteurs à s'engager dans une réflexion prospective à long terme, malgré la précarité de la situation économique du secteur. Ils ont également permis de valider la pertinence des approches consistant à structurer la réflexion des acteurs autour de scénarios préétablis, en mobilisant des approches du type «*scenario workshops*» et «*scenario planning*», peu utilisées dans le domaine de l'eau jusqu'alors. Globalement, les participants ont souligné la pertinence de l'exercice.

Outre ces apports méthodologiques, la démarche adoptée a livré des résultats substantiels. Les ateliers ont permis d'identifier les mesures de politique économique et territoriale que les agriculteurs considéraient comme déterminantes pour l'avenir du secteur. Ils ont permis d'identifier et de débattre de plusieurs pistes d'adaptation : changement des cultures, irrigation de la vigne, politique de réalimentation des nappes.

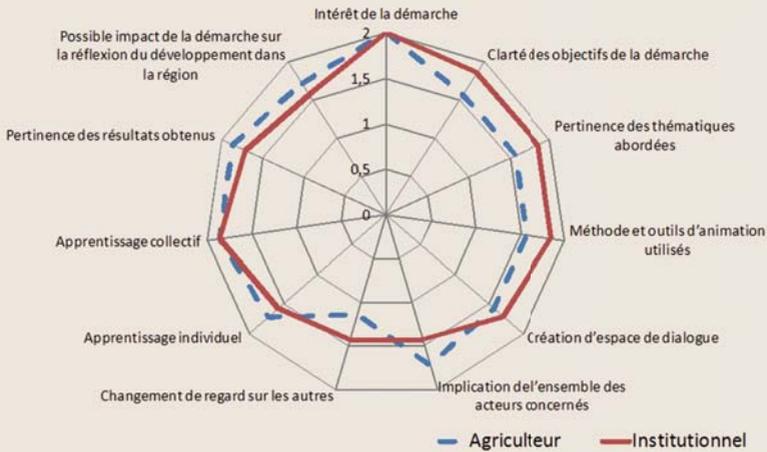


Figure 17. Évaluation par les participants (agriculteurs et institutions publiques) de l'intérêt des ateliers menés au Maroc.

Plus généralement, les agriculteurs mettent en avant les incertitudes et le caractère controversé des diagnostics avancés par les scientifiques et les gestionnaires sur l'eau, sur le climat et sur l'impact de l'agriculture. Mais surtout, ils considèrent le climat et l'eau comme des contraintes et non des enjeux d'adaptation : pour eux, les facteurs importants sont les marchés, le coût de la main d'œuvre et les politiques publiques.

Enfin le troisième atelier a permis de discuter des modalités de gestion et en particulier du rôle respectif de l'Etat et des usagers. Dans un contexte de dialogue difficile entre monde de l'eau et monde agricole, il a montré la nécessité de composer entre des règles de gestion locale et un arbitrage par l'Etat en réaffirmant l'eau comme patrimoine commun.

Les ateliers prospectifs à Querença-Silves ont révélé des données importantes au sujet de la relation des agriculteurs envers leurs cultures et le climat. Globalement, ceux-ci

ne s'estiment pas menacés par le manque d'eau, mais plutôt par les difficultés de la commercialisation de leurs produits. Toutefois, les ateliers participatifs ont révélé leur connaissance fine des liens entre agriculture et variations climatiques. Ainsi, pour les agrumes (principale culture de la région), les événements climatiques – augmentation de la température moyenne en été et au printemps, manque ou excès de précipitations, gel, vent excessif, exposition prolongée aux radiations solaires – ont été discutés de façon approfondie par les agriculteurs. Ces connaissances constituent un socle conceptuel précieux dans la perspective du dialogue entre agriculteurs, parties prenantes et scientifiques.

Le déroulement de l'atelier de prospective a confirmé les résultats de l'enquête préliminaire : les agriculteurs connaissent et mesurent l'effet du climat sur la rentabilité de leur exploitation et de la filière. Ils témoignent de l'intérêt quant à l'expérimentation de nouvelles cultures agronomiques

(en particulier des espèces autochtones) et reconnaissent la nécessité de pratiques de rétention d'eau plus performantes. Les scénarios sur les modes de gouvernance de l'eau pour l'horizon 2030-2050 ont aussi contribué à approfondir les réflexions sur la gestion de la nappe.

Enfin, au Maroc, le projet a permis d'élaborer et de tester une méthode de planification participative du développement agricole au niveau d'un territoire. En particulier, l'accompagnement progressif de collectifs d'agriculteurs, depuis un diagnostic des problèmes de leur village jusqu'à une discussion d'options de développement possibles à l'échelle de la zone d'étude, a débouché sur un échange fructueux lors de l'atelier final. Les différents scénarios de développement définis et discutés ont permis d'ouvrir le débat et d'identifier des pistes d'évolution de l'agriculture (développement de la filière bovine – lait et viande –, arboriculture pluviale, aviculture) et des mécanismes innovants d'accès à l'eau (connexions de villages à des réseaux d'eau potable pour diminuer les coûts d'abreuvement des troupeaux dans des zones où l'eau est devenue très saline).

### *Quels enseignements méthodologiques ?*

Un **solide diagnostic préalable des jeux d'acteurs locaux** est la première condition d'une prospective réussie. Partant de ce diagnostic, la méthode doit être adaptée à chaque contexte – utilisation des sols, situation de la ressource, niveau de maturité des structures de gouvernance, niveau de sensibilisation des parties prenantes. Dans le cadre d'AQUIMED, les différences méthodologiques ont porté sur l'**horizon de temps** considéré (de la situation passée et actuelle à un progressif éloignement dans le futur

ou un « saut » volontaire en 2030 et 2050), **l'échelle géographique** (accompagner les agriculteurs à progressivement, en partant de l'échelle du village, aller vers l'échelle de la nappe, ou bien directement se placer à cette échelle territoriale) ; **les modalités de production des scénarios** (faire réagir les participants sur des scénarios pré-construits ou les co-construire avec eux).

Mais au-delà de ces divergences, les expériences menées dans le cadre du projet AQUIMED ont fait apparaître plusieurs invariants. Il est apparu que la discussion sur l'adaptation au changement climatique ne peut pas être faite de façon indépendante d'une prospective sur l'agriculture et le territoire, à différentes échelles. Sur les trois sites, où l'agriculture est le principal usage de la ressource, il est apparu fécond d'initier les discussions avec les acteurs locaux en parlant de l'agriculture et des territoires pour ne parler d'eau que dans un deuxième temps (l'objectif de discuter d'eau n'ayant pas été caché mais au contraire explicitement présenté dès le début des processus au Portugal et en France). Autrement dit, les discussions sur le changement climatique, en invitant à se projeter sur le long terme, représentent une entrée pour renouveler les questions posées au monde agricole pour la gestion de l'eau. À ce titre, l'équipe d'Aquimed souligne la nécessité de ne pas considérer l'agriculture uniquement comme un usage de l'eau mais de **discuter de manière croisée de politique agricole et de politique de l'eau sur un territoire.** ■



# Liste des publications

# des projets



Cette section propose quelques articles de références produits par les chercheurs des projets de l'appel CIRCLE-Med, de nombreux autres articles ont été produits ou sont en cours de préparation.

Pour plus d'informations vous pouvez consulter le site : [www.circle-med.net](http://www.circle-med.net)

## Acidbiv

**Contact :** Prof. Luis Chicharo, [lchichar@ualg.pt](mailto:Ichichar@ualg.pt)

Range P, Chicharo MA, Ben-Hamadou R, Piló D, Matias D, Joaquim S, Oliveira AP, Chicharo L (2011) Calcification, growth and mortality of juvenile clams *Ruditapes decussatus* under increased pCO<sub>2</sub> and reduced pH: variable responses to ocean acidification at local scales? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 396:177-184.

Chinellato A., Munari M., Matozzo V., Bressan M., Marin M.G. (2010). First attempts in evaluating acidification effects on physiological responses in *Mytilus galloprovincialis*. 27th Congress of the new European Society of Comparative Biochemistry and Physiology, Alessandria (Italy) — Sept. 5–9, 2010, "Biological effects of climatic changes and pollution: from biomarkers to system biology". *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A* 157, S13. doi:10.1016/j.cbpa.2010.06.051

Munari M., Chinellato A., Matozzo V., Bressan M., Marin M.G. (2010). Combined effects of temperature, salinity and pH on immune parameters in the clam *Chamelea gallina*. 27th Congress of the new European Society of Comparative Biochemistry and Physiology, Alessandria (Italy) — Sept. 5–9, 2010, "Biological effects of climatic changes and pollution: from biomarkers to system biology". *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A* 157, S14. doi:10.1016/j.cbpa.2010.06.052

## Aquimed

**Contact:** Nicolas Faysse, nicolas.faysse@cirad.fr

Bento S.; Driouech F.; Errahj M.; Faysse N.; Garin P.; Richard-Ferroudji A.; Rinaudo J.D.; Rollin D.; Schmidt L.; Varanda, M., 2009. Farmers' relations to climate variabilities and changes: the case of groundwater users of coastal aquifers in France, Portugal and Morocco (<http://aquimed.cirad.fr/>)

Richard-Ferroudji A. Garin P. , Matignon M. , Maton L. , Rinaudo J.D. , Rollin D. ,. 2010. Engager des agriculteurs à répondre à l'injonction d'adapter la gestion de l'eau au changement climatique. Actes du colloque Discussion de la mise en œuvre d'ateliers de prospective avec des agriculteurs usagers des nappes du Rousillon (France). In : Agir en situation d'incertitude, Ancey et al. Ed., 22-24 novembre 2010, Montpellier.

Maton, L. Rinaudo, J.D., Caballero, Y., Richard, A. Rollin, D. 2010. Que pensent les agriculteurs et les acteurs institutionnels des impacts du changement climatique sur l'agriculture des Pyrénées Orientales et des adaptations possibles ? Résultats d'une démarche participative. Ed., 22-24 novembre 2010, Montpellier.

## Cantico

**Contact :** Prof. Antonio Marcomin, marcomin@unive.it

**Web :** [isramar.ocean.org.il/CANTICOData](http://isramar.ocean.org.il/CANTICOData)

Agostini P., Torresan S., Micheletti C., Critto A., 2009. Review of Decision Support Systems devoted to the management of inland and coastal waters in the European Union. In: Marcomini A., Suter G.W. II, Critto A. (Eds). Decision Support Systems for Risk Based Management of Contaminated Sites, New York, Springer Verlag, pp 311- 329.

Sanchez-Gomez, E., S. Somot, and A. Mariotti (2009), Future changes in the Mediterranean water budget projected by an ensemble of regional climate models, Geophys. Res. Lett., 36, L21401, doi:10.1029/2009GL040120.

## Climbiomednet

**Contact:** David Mouillot, mouillot@univ-montp2.fr

**Web :** [www.circlemednet.unisalento.it](http://www.circlemednet.unisalento.it)

Guilhaumon F, Basset A, Barbone E, Mouillot D (2011). Species-area relationships as a tool for the conservation of benthic invertebrates in Italian coastal lagoons. Estuarine, Coastal and Shelf Science In Press

## Climwat

**Contact :** Tibor Stigter, tibor.stigter@ist.utl.pt

Silva ACF, Tavares P, Shapouri M, Stigter TY, Monteiro JP, Machado M, Cancela da Fonseca L, Ribeiro L (in press) Estuarine biodiversity as an indicator of groundwater discharge. Estuar Coast Shelf Sci. doi: 10.1016/j.ecss.2011.11.006

Stigter T.Y., Monteiro J.P., Nunes L.M., Vieira J., Cunha M.C., Ribeiro L., Nascimento J., Lucas H. (2009). Screening of sustainable groundwater sources for integration into a regional drought-prone water supply system. Hydrology and Earth System Sciences 13: 1-15

Stigter T., Ribeiro L., Oliveira R., Samper J., Fakir Y., Fonseca L., Monteiro J.P., Nunes J.P., Pisani B. 2010. Studying the impact of climate change on coastal aquifers and adjacent wetlands. Geophysical Research Abstracts 12: EGU2010-15399; proceedings of the EGU 2010 General Assembly, May 2010, Vienna.

## Intermed

**Contact :** Gianluca Sara, gsara@unipa.it

Egzeta-Balic D, Rinaldi A, Peharda M, Prusina I, Montalto V, Niceta N, Sarà G (2011) An energy budget of the subtidal bivalve, *Modiolus barbatus* (Mollusca) at different temperatures. Mar Environ Res 71:79-85. doi:10.1016/j.marenvres.2010.10.005

Sarà G, Reid G, Rinaldi A, Palmeri V, Troell M, Kooijman SALM (in press) Growth and reproductive simulation of candidate shellfish species at fish cages in the southern Mediterranean: Dynamic Energy Budget (DEB) modelling for integrated multi-trophic aquaculture. Aquaculture. doi:10.1016/j.aquaculture.2011.10.042.

Milanese M, Sarà A, Sarà G, Murray J (2011) Climate change, marine policy and the valuation of Mediterranean intertidal ecosystems. *Chem Ecol* 27:95-105.

Sarà G, Kearney M, Helmuth B (2011) Combining heat-transfer and energy budget models to predict local and geographic patterns of mortality in Mediterranean intertidal mussels. *Chem Ecol* 27:135-145.

Sarà G, Sarà A, Milanese M (2011) The Mediterranean intertidal habitat as a natural laboratory to study climate change drivers of geographic patterns in marine biodiversity. *Chem Ecol* 27:91-93

## Medcodyn

**Contacts :** Claudio Rossi: [rossi@unisi.it](mailto:rossi@unisi.it) et en France, Patrick Grillas, [grillas@tourduvalat.org](mailto:grillas@tourduvalat.org)

**Web :** [www.medcodyn.unisi.it](http://www.medcodyn.unisi.it)

Loubet, A., Pichaud, M., Chauvelon P., 2010. Gestion hydraulique et flux hydro-sédimentaires dans l'Île de Camargue. LA HOUILLE BLANCHE/N° 6- 2010, DOI 10.1051/lhb/2010064.

Höhener, P., Comoretto, L., Al Housari, F., Chauvelon, P., Pichaud, M., Cherain, Y., Chiron, S. 2010. Modelling anthropogenic substances in coastal wetlands: application to herbicides in the Camargue (France). *Environmental Modelling and Software*, 25: 1837-1844.

Bouahim S., L. Rhazi B. Amami N. Sahib, M. Rhazi, A. Waterkeyn, A. Zouahri, F Mesleard., S.D., Muller P. Grillas 2010. Impact of grazing on the species richness of plant communities in Mediterranean temporary pools (western Morocco). *Comptes Rendus Biologies* 333: 670-679

Sahib N., L. Rhazi & P. Grillas (in press) Post-disturbance dynamics of plant communities in a Mediterranean temporary pool (Western Morocco): Effects of disturbance size. *Botany*

Rhazi L., M. Rhazi, P., Grillas, N. Sahib & M.Tellal (sous presse): Richesse et dynamique des communautés végétales des plans d'eau temporaires de la zone humide de Sidi Boughaba (Côte Atlantique marocaine). *AGR : African Geoscience Review*

Galgani L., A. Tognazzi, C. Rossi, M. Ricci, J. A. Galvez, A. M. Dattilo, A. Cozar, L. Bracchini, S. A. Loisel, 2010 Assessing the optical changes in dissolved organic matter in humic lakes by spectral slope distributions, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, doi:10.1016/j.jphotobiol.2010.10.001

## Waterknow

**Contacts :** Marco Antonellini, [m.antonellini@unibo.it](mailto:m.antonellini@unibo.it) et en France  
Eric Masson, [eric.masson@univ-lille1.fr](mailto:eric.masson@univ-lille1.fr)

Marconi, V., Antonellini, M., Balugani, E., Dinelli, E. 2011. Hydrogeochemical characterization of small coastal wetlands and forests in the Southern Po plain (Northern Italy). *Ecohydrology*, DOI: 10.1002/eco.204

Antonellini, M., Mollema, P.N., 2010. Impact of ground water salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy. *Ecological Engineering* 36, 1201-1211.

Mollema, P., Antonellini, M., Gabbianelli, G., Laghi, M., Marconi, V., Minchio, A., 2011. Climate and water budget change of a Mediterranean coastal watershed, Ravenna, Italy. *Environmental Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s12665-011-1088-7. ■

A photograph of a natural rock archway overlooking a lush green forest and a turquoise sea. The archway is made of weathered, light-colored rock. The forest is dense and green, covering the hillsides. The sea is a vibrant turquoise color, with some rocks visible in the water. The overall scene is a beautiful natural landscape.

# Bibliographie

## Références bibliographiques

Ben Rais Lasram F., F. Guilhaumon, C. Albouy, S. Somot, W. Thuiller, & D. Mouillot, (2010). The Mediterranean Sea as a 'cul-de-sac' for endemizing climate change. *Global Change Biology*, 16(12): 3233-3245.

Bindoff N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Caze-  
nave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le  
Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Tal-  
ley & A. Un-  
nikrishnan, (2007). Observations:  
Oceanic Climate Change and Sea Level. In: Cli-  
mate Change 2007: The Physical Science Basis.  
Contribution of Working Group I to the Fourth  
Assessment Report of the Intergovernmental  
Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin,  
M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt,  
M. Tignor & H.L. Miller (eds.)]. Cambridge Uni-  
versity Press, Cambridge, United Kingdom and  
New York, NY, USA

CCBio. Connaissance des impacts du change-  
ment climatique sur la biodiversité en France  
métropolitaine, 2011. coord. N.Massu.

Cheung W.W.L., V.W.Y. Lam, & D. Pauly, Eds.  
(2008b). Modelling present and climate-shifted  
distribution of marine fishes and invertebrates.  
University of British Columbia, Fisheries Centre  
Research Reports 16(3): 72 p.

Cheung W.W.L., V.W.Y. Lam, J.L. Sarmiento, K.  
Kearney, R. Watson, & D. Pauly, (2009). Projec-  
ting global marine biodiversity impacts under  
climate change scenarios. *Fish and Fisheries*,  
10(3): 235-251.

Diaz R.J. & R. Rosenberg (2008). Spreading  
dead zones and consequences for marine eco-  
systems. *Science*, 321: 926-929.

Gualdi S., S. Somot, W. May, S. Castellari, M.  
Déqué, M. Adani, V. Artale, A. Bellucci, J. S.  
Breitgand, A. Carillo, R. Cornes, A. Dell'Aquila,  
C. Dubois, D. Efthymiadis, A. Elizalde, L. Gime-  
no, C. M. Goodess, A. Harzallah, S. O. Krichak,  
F. G. Kuglitsch, G. C. Leckebusch, B. L'Heveder,

L. Li, P. Lionello, J. Luterbacher, A. Mariotti, R.  
Nieto, K. M. Nissen, P. Oddo, P. Ruti, A. Sanna,  
G. Sannino, E. Scoccimarro, F. Sevault, M. V.  
Struglia, A. Toreti, U. Ulbrich and E. Xoplaki,  
2011. Future Climate Projections in Regional  
Assessment of Climate Change in the Mediter-  
ranean. A. Navarra, L.Tubiana (eds.), Springer,  
Dordrecht, The Netherlands. In press.

Keeling R.F., A. Körtzinger, & N. Gruber (2010).  
Ocean deoxygenation in a warming world.  
*Annu. Rev. Mar. Sci.* 2: 199-229.

Levitus S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, R. A. Lo-  
carnini, H. E. Garcia, & A. V. Mishonov (2009).  
Global ocean heat content 1955-2008 in light of  
recently re-  
vealed instrumentation problems.  
*Geophys. Res. Lnodc.noaa.gov/OC5/3M\_HEAT\_  
CONTENT/*

Polovina J.J., E.A. Howell, & M. Abecassis  
(2008). Ocean's least productive waters are  
expanding, *Geophabecassis.eu/recherche.html*

Somot S., Sevault F., Déqué M. (2006) Tran-  
sient climate change scenario simulation of the  
Mediterranean Sea for the 21st century using  
a high-resolution ocean circulation model.  
*Climate Dynamics*, Volume 27, Numbers 7-8,  
December, 2006, pp. 851-879, DOI:10.1007/  
s00382-006-0167-z

## Webographie

IPCC, 2007. Synthesis report. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

CIRCE Integrated Project - Climate Change and  
Impact Research: the Mediterranean Environ-  
ment. [www.circeproject.eu](http://www.circeproject.eu)

ENS Lyon, portail Géoconfluences. La mé-  
diterranée, une géographie paradoxale.  
[http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/etpays/  
Medit/Medit.htm](http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/etpays/Medit/Medit.htm)

La gestion intégrée des zones côtières  
(GIZC). [www.developpement-durable.gouv.fr/  
La-gestion-integree-des-zones.html](http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-gestion-integree-des-zones.html) ■

En couverture : Paysage de Corse © Michel Dukhan  
ISBN : 978-2-7466-4507-3 | Éditeur : VERSeau Développement (Montpellier, France)  
Mise en page : Agropolis Productions | Impression en France | Février 2012





Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable  
et de la Mer



CLIMATE IMPACT RESEARCH  
IN RESPONSE COORDINATION  
FOR A LARGER EUROPE  
EU FP7 ERANET

